

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02413

研究課題名(和文) オール金属材料によるスピンの完全無損失化

研究課題名(英文) Dissipationless spin currents in metallic ambipolar conductors

研究代表者

酒井 政道 (SAKAI, Masamichi)

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号：40192588

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：電子と正孔が同時に電気伝導に寄与するアンビポーラ伝導体を非磁性領域(N)に使用して、それを2つの強磁性金属(F)で挟んで構成した二重ヘテロ構造F/N/Fでは、N領域の電子-正孔スピン交換相互作用を介することによって、第1のF領域に書込んだ磁気情報を、スピン緩和を経ずに空間的に離れた第2のF領域に送込むメカニズムを理論的に見出すと共に、それに対応する現象を、垂直磁化膜特性をもつ希土類遷移金属フェリ磁性体(Tb<sub>0.33</sub>Fe<sub>0.67</sub>, Gd<sub>0.25</sub>Fe<sub>0.66</sub>Co<sub>0.09</sub>)と電子正孔補償金属YH<sub>2</sub>の組合せで構成した面内スピンバルブ型Hall素子のHall抵抗とHanle信号に見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピン緩和によってギブス自由エネルギーの一部をエントロピーに変えながら拡散するのがスピン流である。エントロピーを排出しないスピン流はあり得ないとするのがこれまでの定説であった。これが必ずしも成立しない事例を、電子と正孔とが互いのスピンを交換しながら、同時に電気伝導に寄与する物質システムに見出した点で学術的意義をもつ。無損失スピン流は、同じ向きに磁化した2つの強磁性金属で挟まれたアンビポーラ伝導体内で発生する。これは断熱されたチャネルを熱流が高温から低温領域に向かって流れるのに相当する。磁気情報の無損失長距離伝送によって、メモリーやロジック回路などの低消費電力化が見込まれる点で社会的意義をもつ。

研究成果の概要(英文)：Theoretical and experimental studies were conducted for seeking a new spin-charge coupling mechanisms in a magnetic double-hetero structure F/N/F, where an ambipolar conductor YH<sub>2</sub> was used as a nonmagnetic region (N) and a rare-earth transition metal (RE-TM) ferrimagnet with perpendicular magnetic anisotropy was used as a ferromagnetic region (F). The spin-exchange interaction between electrons and holes in YH<sub>2</sub> enables us to predict formation of a nondissipative mode with an infinite spin diffusion length in addition to a dissipative one. The present set-up allows us to observe the transverse resistance due to inverse spin Hall effect, which mirrors the magnetization of the RE-TM electrode in the planer Hall-bar structure with a length of 90 μm. This finding supports our prediction of nondissipative spin transport nature.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピン流 アンビポーラ伝導体 電子正孔補償金属 イットリウム二水素化物 希土類遷移金属フェリ磁性体 Baber散乱 スピン交換相互作用

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

強磁性体 (F) と非磁性体 (N) との界面を電流が横切るとき、電流の向きに、急峻にスカラーポテンシャル (電位) が減少する。これをスピン共役電圧 (SCV) と云う。N 領域を挟んで反対側に第 2 の F 領域を加えて、二重ヘテロ構造 F/N/F を構成した場合には、第 2 の F/N 界面では、第 1 の F 領域の磁化の向きに応じて異なる SCV 値、 $V_{\uparrow}$  と  $V_{\downarrow}$  が出力される。この原理は、不揮発性マグネティックランダムアクセスメモリー (MRAM) などに応用され、デバイス動作に必要な SCV 差  $\Delta V_{scv} (=V_{\uparrow} - V_{\downarrow})$  を出来るだけ少ない電流下で出力するべく、国内外で研究がしのぎを削っている。この原理は、第 1 の F 領域に書込まれた磁気情報を空間的に離れた第 2 の F/N 界面において電気的に検出できることを意味する。インピーダンス整合下ではその直流電力は光速で伝送されるので、磁性体と非磁性体から構成する磁気通信は光通信並みの速さで可能であると云える。

$\Delta V_{scv}$  のしくみにはスピン拡散が拘わる。スピン拡散には、熱拡散に似た特徴が見られる。高温領域と低温領域の温度差を時間的に一定にした定常状態では、高温領域から離れるにしたがって温度が低下する。このとき断熱が不完全な場合には、温度は距離と共に指数関数的に低下する。温度低下の度合いを表す熱拡散長は、系外への熱の漏れが大きいと小さくなるのに対応して、スピン拡散ではスピン緩和が速いほどスピン拡散長は短い。一方、断熱が完全な場合には、熱拡散長は無量大であり、温度は高温領域からの距離に比例して低下するので一定な温度勾配に沿って、熱流は時空間的に絶え間なく持続する。この状況をスピン流に対して実現しようとしても、スピン緩和は材料固有の性質なため、断熱のような外部条件を施せばよいと云う訳には行かず、結果的に、 $\Delta V_{scv}$  は、第 1 と第 2 の F 領域間距離の増加と共に、材料固有のスピン拡散長 (例えば Au では約 100 nm) に応じて、指数関数的に小さくなるため、10  $\mu\text{m}$  以上の巨視的スケールでの磁気情報伝送に向かないと云うのがこれまでの定説であった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、電子と正孔が同時に電気伝導に寄与するアンビポーラ伝導体に注目して、電荷の自由度 (正か負) とスピンの自由度 (アップかダウン) との結合がスピン流に無損失特性をもたらすことができるのかを調べることである。もし、無損失スピン流 (エントロピー生成の伴わないスピン流) を発生できれば、適切な 2 バンド型金属材料を N 領域に使用して構成した F/N/F 構造では、磁気情報の長距離伝送が可能になる。

### 3. 研究の方法

#### (1) 理論研究の方法

スピン緩和と云う微視的な事象は、巨視的には化学ポテンシャル (1 粒子あたりのギブス自由エネルギー) に反映されるので、まず 2 キャリヤスピン系の熱力学を Gibbs-Duhem 関係式にもとづいて議論し、アンビポーラ伝導体におけるスピン緩和に伴うエントロピー生成率を定式化する。

電子論的なアプローチも採用する。その際、電子と正孔間の相互作用として、Baber 型散乱に注目する。Baber 型散乱では、衝突の際に電子と正孔が互いに入れ替わることはないが、スピンを交換することは禁止されていない。スピン交換を伴う電子 - 正孔間クーロン相互作用が主要なスピン緩和の原因となる場合について、アンビポーラ伝導体におけるスピン輸送を、Boltzmann 輸送方程式を使って解析する。この結果と観測量とを結びつけるために、2 流体 Drude モデルにもとづいて、アンビポーラ伝導体と強磁性金属から構成される F/N/F 構造における Hall 抵抗の表式を導出する。

#### (2) 実験研究の方法

アンビポーラ伝導体とは、電子と正孔が同時に電気伝導に寄与する材料であり、単体元素では  $\beta$ -Sn (白錫) や Mo に代表される電子正孔補償金属、および C (グラファイト) や Bi に代表される半金属がそれに該当する。化合物まで含めるとその数は約 60 種類におよぶ。本研究では、研究代表者の先行研究によってアンビポーラ性が見出された  $\text{YH}_2$  を F/N/F 構造に使用する。新規アンビポーラ性伝導体の探索研究も行う。

非磁性のアンビポーラ伝導体 (N) と強磁性金属 (F) から、面内スピンバルブ型構造にもとづく Hall-bar 素子を製作する。トポロジ的には F/N/F 構造であるが、建物に例えると 1 階部が平面的形状の N 領域であり、2 階部に 2 つの F 領域があって、それらがある距離隔てて設置

されている。したがって、N 領域を流れる電流やスピン流の向きは、面内に平行である。N 領域の側面には Hall 電圧計測用電極の非磁性金属をオーミック接合する。実験に使用した典型的なサンプルの光学顕微鏡写真を図 1 に示す。約  $90\ \mu\text{m}$  の N 領域長をもつ。1 から 6 番電極には Au が接続され、7 と 8 番電極には垂直磁化膜金属（希土類遷移金属フェリ磁性体）が接続される。7-8 番間にバイアス電流を流し、1~6 番電極によって Hall 電圧を検出する。電圧検出位置と 7 または 8 番との距離がスピン拡散長以下であれば、バイアス電流中に紛れているスピン流成分は逆スピン Hall 効果 (ISHE) によって Hall 電圧を誘起する。

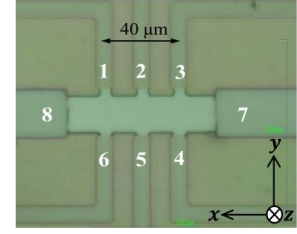


図 1 製作した Hall-bar 素子

垂直磁化膜の磁化制御は Hall-bar 面に垂直に印加する外部磁場によるので、上記の方法で検出される Hall 電圧には正常 Hall 効果 (OHE) が含まれる。OHE 成分を除去するために、電流を注入せずスピン流だけを注入して ISHE を観測する実験も行う。この場合には、6 番から 8 番に向けて電流を流して、2-5 番および 3-4 番間の電圧を計測する。

アンビポーラ伝導体の代わりに単一バンド伝導体として Au を使った測定を行う。Au のスピン拡散長は  $100\ \text{nm}$  程度なので、スピン注入源から約  $20\ \mu\text{m}$  離れている 2-5 番間には、ISHE 尊号は観測されず、外部磁場による OHE 信号だけが観測されるはずである。

観測される信号が磁性電極からのスピン注入に拠るものであって、spurious な (偽の) 信号でない事が重要である。垂直磁化膜電極 (7 と 8 番) から注入されるキャリアスピン偏極の向きは Hall-bar 面に垂直なので、面内磁場 ( $B_{\parallel}$ ) を与えれば、注入スピン磁気モーメントは、 $B_{\parallel}$  の周りを歳差運動する。 $B_{\parallel}$  が弱くて歳差運動の Larmor 周期 ( $T_L$ ) がスピン緩和時間 ( $\tau_S$ ) に比べて大きい場合は ISEH 信号が観測できるが、 $B_{\parallel}$  を増加させて  $T_L$  が  $\tau_S$  と同程度かそれ以下になると ISEH 信号は消滅する (Hanle 効果)。この点を検証するために、スピン注入下 Hall 電圧を  $B_{\parallel}$  の関数として測定する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 理論研究の成果

熱力学の Gibbs-Duhem (GD) 関係式を 2 キャリヤスピン系に使うことによって、一定温度かつ一定圧力下では

$$(1 + \Phi)d\mu_{\uparrow}^{(h)} + (1 - \Phi)d\mu_{\uparrow}^{(e)} = 0 \quad , \quad (1)$$

を得た。ここで、 $d\mu_{\nu}^{(i)}$  ( $i = e, h, \nu = \uparrow, \downarrow$ ) は電子と正孔のスピン混合による化学ポテンシャル変化分である。化学ポテンシャルは、電子と正孔とでは好き勝手に変化できず、互いの関係が式 (1) に拘束されることを意味する。したがって、電子スピンと正孔スピンはそれぞれ独立に拡散せず、互いに連携しながら拡散する。スピン拡散に伴うエントロピー密度 ( $S$ ) の時間変化率、熱流密度 ( $\mathbf{J}_Q$ )、電流密度 ( $\mathbf{J}_C$ )、スピン流密度との関係は次式に集約することが出来た：

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial t} + \text{div} \left( \frac{\mathbf{J}_Q}{T} \right) &= \mathbf{J}_Q \cdot \text{grad} \left( \frac{1}{T} \right) - \frac{1}{T} \mathbf{J}_C \cdot \text{grad} V \\ &- \frac{\Phi}{(1 - \Phi)e^2 T} \left[ \sigma_{\uparrow}^{(h)} + \sigma_{\downarrow}^{(h)} - \frac{1 + \Phi}{1 - \Phi} (\sigma_{\uparrow}^{(e)} + \sigma_{\downarrow}^{(e)}) \right] \left( \frac{\Delta\mu_0^{(h)}}{\ell_P} \right)^2 \exp \left( -\frac{2x}{\ell_P} \right) \\ &+ \frac{1}{(1 - \Phi)e^2 T} \left[ \sigma_{\uparrow}^{(h)} + \sigma_{\downarrow}^{(h)} + \frac{1 + \Phi}{1 - \Phi} (\sigma_{\uparrow}^{(e)} + \sigma_{\downarrow}^{(e)}) \right] \left( \frac{\Delta\mu_0^{(h)}}{\ell_{AP}} \right)^2 \exp \left( -\frac{2x}{\ell_{AP}} \right) \\ &- \frac{4\Phi}{(1 - \Phi)T\tau_S} \left( N^{(h)} - \frac{1 + \Phi}{1 - \Phi} N^{(e)} \right) (\Delta\mu_0^{(h)})^2 \left[ \exp \left( -\frac{2x}{\ell_P} \right) - \exp \left( -\frac{2x}{\ell_{AP}} \right) \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $\ell_P$ ,  $\ell_{AP}$  次式で与えられ、特に、後者は電子濃度と正孔濃度とが接近するとき ( $\Phi \rightarrow 0$ )、無限大になる。

$$\ell_P = \left[ \frac{\tau_S}{4e^2} \frac{\sigma_{\uparrow}^{(h)} + \sigma_{\downarrow}^{(h)} - \frac{1 + \Phi}{1 - \Phi} (\sigma_{\uparrow}^{(e)} + \sigma_{\downarrow}^{(e)})}{N^{(h)} - \frac{1 + \Phi}{1 - \Phi} N^{(e)}} \right]^{1/2}, \quad \ell_{AP} = \left[ \frac{\tau_S}{4e^2} \frac{\sigma_{\uparrow}^{(h)} + \sigma_{\downarrow}^{(h)} + \frac{1 + \Phi}{1 - \Phi} (\sigma_{\uparrow}^{(e)} + \sigma_{\downarrow}^{(e)})}{\Phi \left( N^{(h)} - \frac{1 + \Phi}{1 - \Phi} N^{(e)} \right)} \right]^{1/2} \quad (\Phi \neq \pm 1). \quad (3)$$

したがって、 $\Phi \rightarrow 0$  のとき、式 (2) 右辺の第 3, 4, および 5 項はゼロに漸近し、 $\Phi = 0$  のときには、スピン流に伴うエントロピー生成が消滅する。

熱力学的考察からアンビポーラ伝導体では無損失スピン流が期待できそうである。そこで、電子-正孔補償金属の電気抵抗には、Baber 散乱が大きく寄与することに注目して、

衝突前後で電子と正孔とが互いのスピンを交換する過程を導入し、これらがスピン緩和の主要因するモデル下で、スピン輸送を Boltzmann 輸送方程式にもとづいて解析した。スピン輸送を決定する基礎方程式として、

$$D^{(h)}\nabla^2 n_{\uparrow}^{(h)} = K + \frac{\partial}{\partial t} n_{\uparrow}^{(h)}, \quad D^{(e)}\nabla^2 n_{\uparrow}^{(e)} = -K + \frac{\partial}{\partial t} n_{\uparrow}^{(e)}. \quad K = \frac{n_{\uparrow}^{(h)}}{\tau_1} - \frac{n_{\downarrow}^{(h)}}{\tau_2} + \frac{n_{\downarrow}^{(e)}}{\tau_1} - \frac{n_{\uparrow}^{(e)}}{\tau_2} \quad (4)$$

と云う連立方程式が得られ、定常解として2種類の固有値を得た：

$$\kappa^2 = \left( \frac{1}{D^{(h)}} + \frac{1}{D^{(e)}} \right) \left( \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \right), \quad \kappa^2 = 0. \quad (5)$$

$\kappa$ の逆数がスピン拡散長であるので、2つの固有モードのうち、1つは無限大のスピン拡散長をもつ。それぞれに対応する固有モードを化学ポテンシャルの変化分で表現したのが次式である：

$$\sigma_e d\mu_{\uparrow}^{(e)} - \sigma_h d\mu_{\uparrow}^{(h)} = 0 \quad N_e d\mu_{\uparrow}^{(e)} + N_h d\mu_{\uparrow}^{(h)} = 0. \quad (6)$$

フェルミレベルにおける状態密度で定義した電荷偏極度  $\Phi' = (N_h - N_e)/(N_h + N_e)$  を使うと、スピン拡散長が無限大（スピン緩和時間が無限大）に対応する固有モードは、

$$(1 + \Phi')d\mu_{\uparrow}^{(h)} + (1 - \Phi')d\mu_{\uparrow}^{(e)} = 0 \quad (7)$$

のように、式(1)に類似する。電子バンドのフェルミエネルギーが正孔バンドのそれに等しい場合には、自由電子近似下では、 $\Phi' = \Phi$ となり、式(7)は式(1)に一致する。つまり、Baber 散乱モデルから得られる、スピン拡散長が無限大（スピン緩和時間が無限大）になる固有モードはGD関係式に完全に整合することが分かった。

後述する実験研究では、スピン注入型 Hall-bar 素子を使って Hall 電圧を測定する。アンビポーラ伝導体の Hall 電圧 ( $V_T$ ) の表式を、2流体 Drude モデルにもとづいて導出したのが次式である：

$$\begin{aligned} V_T = & -\rho_{yx} \int_0^w J_x dy \\ & + \left( \frac{1}{e} \right) \rho_{xx} \left[ (\sigma_{\uparrow,xy}^{(h)} - \sigma_{\downarrow,xy}^{(h)}) \int_0^w \frac{\partial \mu_{\uparrow}^{(h)}}{\partial x} dy - (\sigma_{\uparrow,xy}^{(e)} - \sigma_{\downarrow,xy}^{(e)}) \int_0^w \frac{\partial \mu_{\uparrow}^{(e)}}{\partial x} dy \right] \\ & - \left( \frac{1}{e} \right) \rho_{yx} [(\sigma_{\uparrow,xy}^{(h)} - \sigma_{\downarrow,xy}^{(h)})(\mu_{\uparrow}^{(h)}(x, w) - \mu_{\uparrow}^{(h)}(x, 0)) - (\sigma_{\uparrow,xy}^{(e)} - \sigma_{\downarrow,xy}^{(e)})(\mu_{\uparrow}^{(e)}(x, w) - \mu_{\uparrow}^{(e)}(x, 0))], \end{aligned} \quad (8)$$

$w$ は、Hall-bar 素子幅である。研究で使う素子では、アンビポーラ伝導体(N)を、磁気モーメントの向きが同じ2つの強磁性体(F)で挟んでいる。2つのF/N界面における境界条件を満たすように次元拡散ドリフト方程式を解析的に解くことによって、N領域の $\mu_{\uparrow}^{(i)}$  ( $i = e, h$ )を、F/N界面からの距離 $x$ の関数として導出できた：

$$\mu_{\uparrow}^{(e)} = \frac{PrFrNc}{N_e(D_e + D_h)(2r_F + r_N)} \left[ \frac{eD_h(N_e - N_h)}{e^{L/\lambda} - e^{-L/\lambda}} \left( (e^{-L/\lambda} + 1)e^{x/L} - (e^{L/\lambda} + 1)e^{-x/L} \right) + \frac{\sigma_e + \sigma_h}{e} \left( \frac{x}{L} - \frac{1}{2} \right) \right] \quad (9)$$

$$\mu_{\uparrow}^{(h)} = \frac{PrFrNc}{N_h(D_e + D_h)(2r_F + r_N)} \left[ -\frac{eD_e(N_e - N_h)}{e^{L/\lambda} - e^{-L/\lambda}} \left( (e^{-L/\lambda} + 1)e^{x/L} - (e^{L/\lambda} + 1)e^{-x/L} \right) + \frac{\sigma_e + \sigma_h}{e} \left( \frac{x}{L} - \frac{1}{2} \right) \right] \quad (10)$$

ただし、 $P$ はF領域のキャリヤスピン偏極度、 $L$ はN領域長、 $r_F = \rho_F \lambda_F / (1 - P^2)$ 、 $r_N = \rho_N L$ である。座標 $x$ に比例する項がスピン拡散長無限大のモードからの寄与であり、空間的に一様なスピン流がN領域に発生することが分かる。熱流で言えば、断熱が完全な場合に対応する。式(9)と(10)を式(8)に代入すれば、Hall電圧を $x$ の関数として計算でき、実験と比較できる。

## (2) 実験研究の成果

Hall-bar 素子の7と8番電極に使用した  $\text{Tb}_{0.33}\text{Fe}_{0.67}$  の室温磁化曲線を図2に示す。N領域にAuを使って、7-8番間に電流  $I$  を供給するときの Hall 抵抗 ( $R_{Hall}$ ) には、式(8)第1項に対応する OHE 成分だけが観測されるのに対して、N領域がアンビポーラ伝導体  $\text{YH}_2$  のときには、 $\text{Tb}_{0.33}\text{Fe}_{0.67}$  の磁化曲線に相似な信号が得られた(図3)。 $R_{Hall}$ と式(8)の $V_T$ との関係は、 $V_T = -R_{Hall}I$ である。電流がN領域全体に流れないように6-8番間に電流を供給した $R_{Hall}$ にも同様な信号が観測された(図4)。これらは  $\text{Tb}_{0.33}\text{Fe}_{0.67}$  電極から注入されたスピン流が逆スピン Hall

効果によって Hall 電圧に変換された、式(8)第2項、に対応する。外部磁場に対して偶関数的に振舞う第3項に対応する信号は弱いながらも図3に観測されている。これが図4に観測されないのは、非局所測定のため第3項では  $\rho_{yx} = 0$  となるためである。次に、7番電極に  $\text{Gd}_{0.25}\text{Fe}_{0.66}\text{Co}_{0.09}$  を、8番電極に Au を使って、7-8番間に電流を供給するときの  $R_{\text{Hall}}$  を3つの地点で観測した。 $\text{Gd}_{0.25}\text{Fe}_{0.66}\text{Co}_{0.09}$  電極から遠ざかると共に信号強度は小さくなり、その片対数プロットから得られる、スピン拡散長は約  $55 \mu\text{m}$  であった (図5)。

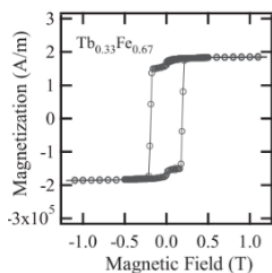


図2

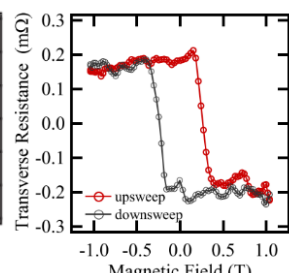


図3

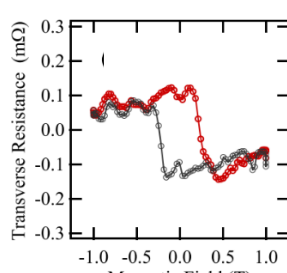


図4

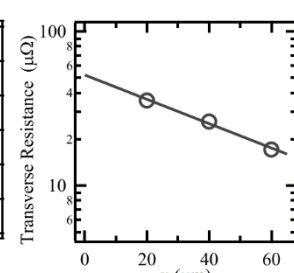


図5

観測される信号が磁性電極からのスピン注入に拠るものであって spurious な信号でない事を2種類の手法、(A) 希土類遷移金属フェリ磁性体の磁気補償効果を利用する方法、および(B) Hanle 効果によって確認した。

図6に Hall 抵抗の温度依存性を示す。この測定では図1における7と8番電極に  $\text{Gd}_{0.25}\text{Fe}_{0.66}\text{Co}_{0.09}$  を使用した。アンビポーラ伝導体は  $\text{YH}_2$  である。 $\text{Gd}_{0.25}\text{Fe}_{0.66}\text{Co}_{0.09}$  電極の磁気補償温度 ( $T_m$ ) を境にして信号の極性が反転した。 $T_m$  以上では、Fe の 3d 電子の磁気モーメント ( $\mathbf{m}_{3d}$ ) は  $\text{Gd}_{0.25}\text{Fe}_{0.66}\text{Co}_{0.09}$  の全磁気モーメント ( $\mathbf{m}_{\text{total}}$ ) に平行であるのに対して、 $T_m$  以下では、 $\mathbf{m}_{3d}$  と  $\mathbf{m}_{\text{total}}$  は反平行になることが分かっている。 $\mathbf{m}_{\text{total}}$  が常に外部磁場と同じ向きであることに注意すれば、 $\mathbf{m}_{3d}$  の向きは  $T_m$  前後で反転することが分かる。 $\text{Gd}_{0.25}\text{Fe}_{0.66}\text{Co}_{0.09}$  のキャリアスピン偏極を担うのは主に Fe の 3d 電子である。したがって、式(9)と(10)中のキャリアスピン偏極度  $P$  は主に Fe 3d 電子の偏極を反映する。したがって、 $P$  の符号、ひいては式(8)第2項の符号は、 $T_m$  前後で反転する。この挙動は図6の結果と整合する。

図7に室温における Hanle 測定結果を示す。測定サンプルは図6と同一である。ゼロ磁場付近に Hanle 効果に特徴的なピーク形状の信号が観測された。面内磁場  $B_{\parallel}$  が増加すると共に、スピンの Larmor 周期 ( $T_L$ ) は  $B_{\parallel}$  に反比例して減少し、 $T_L > \tau_s$  のうちは、ISHE による Hall 電圧は観測されるが、 $T_L < \tau_s$  になればそれは消滅する。したがって、Hall 抵抗がほとんど消失する磁場値 (約 0.1mT) に対応する  $T_L$  から近似的に  $\tau_s = 400 \text{ ns}$  が得られる。ただし、g 因子を2とした。拡散係数  $D$  として Cu の値 ( $0.047 \text{ m}^2/\text{s}$ ) を使って、 $\sqrt{D\tau_s}$  から求めたスピン拡散長は約  $130 \mu\text{m}$  である。これは、図6から得られた値の約2.4倍である。 $D$  値の不確かさを考慮すれば、図7の結果は図6の結果に対応していると考えられる。

実験的には、アンビポーラ伝導体  $\text{YH}_2$  の室温スピン拡散長は約  $55 \mu\text{m}$  前後と見積もられた。この値は通常の金属の約100倍である。この原因が通常値に比べて約10000倍大きいスピン緩和時間に帰すると考えざるを得ない実験結果が得られた。この現象が Baber 型電子-正孔スピン交換相互作用によるスピン緩和モデルによって導出された、実効的にスピン拡散長が無限大 (スピン緩和時間が無限大) となるモードに対応すると結論するには、2つの問題に取り組む必要がある。第1に、本研究では、Baber 散乱の他に通常のスピン軌道相互作用 (SOI) によるスピン緩和の項を加えたスピン輸送の計算も行なったが、それによると、SOI を含めた途端にスピン拡散長無限大のモードは消滅し、スピン緩和時間が長大化する見込みがなくなる。まだ、SOI によるスピン緩和を避ける機構は見つかっていない。第2に、図7の Hanle 信号の大きさは、ゼロ磁場で観測される ISHE 信号の3分の1程度しかない。残り3分の2の信号は、Larmor 運動に影響されずに残ることになるが、その理由は不明である。

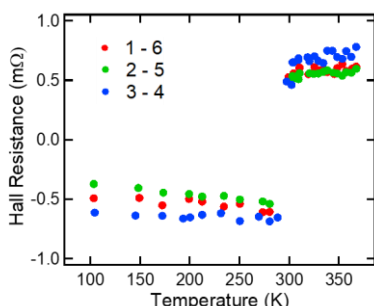


図6

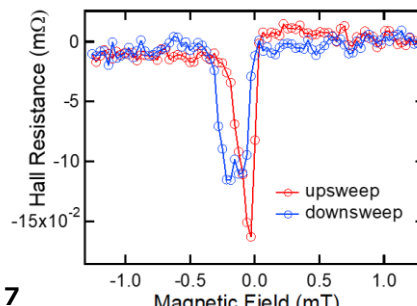


図7

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

|  |                           |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名<br>T. Yoshizumi, K. Koshiba, S. Kitsunai, T. Yoshizawa, O. Nakamura, M. Sakai   | 4. 巻<br>544               |
| 2. 論文標題<br>Nanoparticulate Pt-catalyzed hydrogenation of Yb films: Towards hydrides with higher hydrogen compositions              | 5. 発行年<br>2021年           |
| 3. 雑誌名<br>Chemical Physics   | 6. 最初と最後の頁<br>111121:1-5  |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.chemphys.2021.111121   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-                 |
| 1. 著者名<br>S. Kitsunai, D. Fujii, T. Yoshizumi, S. Hasegawa, O. Nakamura, M. Sakai  | 4. 巻<br>419               |
| 2. 論文標題<br>Hall effect in ytterbium hydrides   | 5. 発行年<br>2021年           |
| 3. 雑誌名<br>Physics Letters A  | 6. 最初と最後の頁<br>127740:1-4  |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.physleta.2021.127740   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-                 |
| 1. 著者名<br>M. Sakai, A. M. Sanjida, T. Yoshizumi, S. Hasegawa   | 4. 巻<br>34                |
| 2. 論文標題<br>Spatiotemporal characteristics of spin transport in compensated metals with electron-hole exchange interaction          | 5. 発行年<br>2022年           |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Physics: Condensed Matter   | 6. 最初と最後の頁<br>055801:1-12 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1088/1361-648X/ac327e   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>該当する              |
| 1. 著者名<br>Toshihiro Yoshizumi, Daiki Fujii, Satoru Kitsunai, Kousuke Igarashi, Masamichi Sakai, Osamu Nakamura, Shigehiko Hasegawa | 4. 巻<br>384               |
| 2. 論文標題<br>Magneto-transport properties in fcc ytterbium   | 5. 発行年<br>2020年           |
| 3. 雑誌名<br>Physics Letters A  | 6. 最初と最後の頁<br>126661-1~4  |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.physleta.2020.126661   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-                 |

|   |                             |
|---|-----------------------------|
| 1. 著者名<br>Sanjida Aktar, Masamichi Sakai, Toshihiro Yoshizumi, Shigehiko Hasegawa                               | 4. 巻<br>10                  |
| 2. 論文標題<br>Spin and charge transports with thermodynamic electron-hole correlation in nearly compensated metals | 5. 発行年<br>2020年             |
| 3. 雑誌名<br>AIP Advances  | 6. 最初と最後の頁<br>075210-1 ~ 10 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1063/5.0013628   | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)  | 国際共著<br>-                   |

|   |                            |
|---|----------------------------|
| 1. 著者名<br>Aktar Mst. Sanjida, Masamichi Sakai, Shigehiko Hasegawa, Osamu Nakamura, Hiroyuki Awano   | 4. 巻<br>12                 |
| 2. 論文標題<br>Entropy production by thermodynamic currents in ambipolar conductors with identical spin dynamics characters between holes and electrons | 5. 発行年<br>2019年            |
| 3. 雑誌名<br>Applied Physics Express   | 6. 最初と最後の頁<br>053004-1 ~ 5 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.7567/1882-0786/ab101e  | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-                  |

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| 1. 著者名<br>K. Sato, Y. Takahashi, S. Akisato, R. Mikami, N. Sugauma, Y. Ashizawa, H. Kawaguchi, Y. Nakajima, T. Ukai, Y. Fuji, T. Hanajiri, J. Kaneko, O. Nakamura, P. V. Thach, H. Awano, S. Hasegawa and M. Sakai | 4. 巻<br>98                  |
| 2. 論文標題<br>Spin-charge-coupled transverse resistance in an ambipolar conductor YH <sub>2</sub> -based Hall-bar structure with perpendicularly magnetized current-injection electrodes                              | 5. 発行年<br>2023年             |
| 3. 雑誌名<br>Physica Scripta  | 6. 最初と最後の頁<br>045912:1 - 15 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1088/1402-4896/acc4f2   | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-                   |

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>山崎 郁生, 伊東 輝大, 佐藤 圭, 酒井 政道, 吉住 年弘, 花尻 達郎, 清水 正章, 中村 修, 鷺見 聡, 粟野 博之, 長谷川繁彦                           |
| 2. 発表標題<br>フェリ磁性体Gd <sub>2</sub> 5Fe <sub>66</sub> Co <sub>9</sub> をスピン注入源としたYH <sub>2</sub> の逆スピンホール効果の温度依存性 |
| 3. 学会等名<br>第82回応用物理学会秋季学術講演会  |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>酒井政道, Mst. Sanjida Aktar, 吉住年弘, 長谷川繁彦  |
| 2. 発表標題<br>Baber型電子 - 正孔衝突にもとづくスピン緩和項のCT対称性とスピン輸送 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2021年秋季大会                        |
| 4. 発表年<br>2021年                                   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>酒井政道, 吉住年弘, 長谷川繁彦                     |
| 2. 発表標題<br>Baber型電子 - 正孔衝突による運動量およびスピン同時緩和とスピン輸送 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会第77回年次大会                        |
| 4. 発表年<br>2022年                                  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Mst. Sanjida Aktar, 酒井 政道, 吉住 年弘, 長谷川 繁彦 |
| 2. 発表標題<br>補償金属におけるBaber-type散乱とスピン輸送               |
| 3. 学会等名<br>2020年日本物理学会2020年秋季大会                     |
| 4. 発表年<br>2020年                                     |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>橘内 悟, 藤井 大樹, 吉住 年弘, 長谷川 繁彦, 中村 修, 酒井 政道 |
| 2. 発表標題<br>イッテルビウム三水素化物膜の合成と伝導特性の評価                |
| 3. 学会等名<br>2021年第68回応用物理学会春季学術講演会                  |
| 4. 発表年<br>2021年                                    |



|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>酒井 政道, Mst. Sanjida Aktar, 吉住 年弘, 長谷川 繁彦 |
| 2. 発表標題<br>補償金属におけるBaber-type散乱とスピン輸送               |
| 3. 学会等名<br>2021年日本物理学会第76回年次大会                      |
| 4. 発表年<br>2021年                                     |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Mst. Sanjida Aktar, 酒井政道, 谷川繁彦, 中村 修, 粟野博之 |
| 2. 発表標題<br>両極性伝導体におけるスピン依存化学ポテンシャルとコヒーレンス長            |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2019年秋季大会                            |
| 4. 発表年<br>2019年                                       |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>藤井 大樹, 橘内 悟, 五十嵐 滉介, 吉住 年弘, 酒井 政道, 長谷川 繁彦, 中村 修 |
| 2. 発表標題<br>Hallおよび横磁気抵抗に基づくYb における両極性伝導の観測                 |
| 3. 学会等名<br>2019年第80回応用物理学会秋季学術講演会                          |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>吉住 年弘, 小柴 慶悟, 藤井 大樹, 橘内 悟, 五十嵐 滉介, 吉澤 輝, 酒井 政道, 中村 修 |
| 2. 発表標題<br>イッテルビウム水素化物薄膜における相転移動力学解析                            |
| 3. 学会等名<br>2019年第80回応用物理学会秋季学術講演会                               |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Aktar MST Sanjida, M. Sakai, O. Nakamura, S. Hasegawa, H. Awano        |
| 2. 発表標題<br>Theoretical evaluation of spin coherence length of ambipolar conductor |
| 3. 学会等名<br>2019年第80回応用物理学会秋季学術講演会   |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>佐藤 枢, 芦沢優吾, 高橋侑太郎, 川口颯天, Mst. Sanjida Aktar, 三上亮太, 秋里宗次郎, 菅沼奈央, 吉住年弘, 酒井政道, 花尻達郎, 中島義賢, 徳田正秀, 藤井泰彦, 長谷川繁彦, 中村 修, P. V. Thach, 粟野博之 |
| 2. 発表標題<br>Hall-bar法を用いた電子および正孔スピンの対向注入下におけるYH <sub>2</sub> の共鳴ホール効果  |
| 3. 学会等名<br>2019年第80回応用物理学会秋季学術講演会   |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>小柴 慶悟, 橘内 悟, 五十嵐 滉介, 川口 颯天, 吉住 年弘, 酒井 政道, 中村 修 |
| 2. 発表標題<br>Pt触媒効果を用いたYb膜の水素化                              |
| 3. 学会等名<br>2020年第67回応用物理学会春季学術講演会                         |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>橘内 悟, 藤井 大樹, 五十嵐 滉介, 吉住 年弘, 酒井 政道, 長谷川 繁彦, 中村 修 |
| 2. 発表標題<br>常圧下におけるイッテルビウム二および三水素化物膜の作製                     |
| 3. 学会等名<br>2020年第67回応用物理学会春季学術講演会                          |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>中村 修, 小柴慶悟, 吉澤 輝, 吉住年弘, 栗田満史, 酒井政道 |
| 2. 発表標題<br>希土類水素化物半導体薄膜YbH <sub>2</sub> の光学特性 |
| 3. 学会等名<br>2020年第67回応用物理学会春季学術講演会             |
| 4. 発表年<br>2020年                               |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>芦澤 優吾, 高橋 侑太郎, 川口 颯天, 山崎 郁生, Mst. Sanjida Aktar, 酒井 政道, 吉住 年弘, 花尻 達郎, 徳田 正秀, 藤井 泰彦, P. V. Thach, 粟野 博之, 長谷川 繁彦, 中村 修 |
| 2. 発表標題<br>Gd <sub>25</sub> Fe <sub>66</sub> Co <sub>9</sub> 電極を用いたY単層のホール効果測定  |
| 3. 学会等名<br>2020年第67回応用物理学会春季学術講演会   |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>川口 颯天, 芦澤 優吾, 高橋 侑太郎, 山崎 郁生, Mst. Sanjida Aktar, 酒井 政道, 吉住 年弘, 花尻 達郎, 徳田 正秀, 藤井 泰彦, 中村 修, Pham Van Thach, 粟野 博之, 長谷川繁彦 |
| 2. 発表標題<br>両極性伝導体YH <sub>2</sub> におけるスピン拡散長の評価  |
| 3. 学会等名<br>2020年第67回応用物理学会春季学術講演会   |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Aktar MST Sanjida, M. Sakai, T. Yoshizumi, O. Nakamura, S. Hasegawa and H. Awano   |
| 2. 発表標題<br>An effective carrier compensation under spin injection to ambipolar conductor with intrinsically different hole and electron densities |
| 3. 学会等名<br>2020年第67回応用物理学会春季学術講演会   |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Mst. Sanjida Aktar, 酒井政道, 長谷川繁彦, 中村 修, 粟野博之 |
| 2. 発表標題<br>スピン注入が誘起する完全キャリア補償とホール効果                    |
| 3. 学会等名<br>2020年日本物理学会第75回年次大会                         |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|                                      |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>橋内 悟, 木村 仁哉, 酒井 政道, 吉住 年弘 |
| 2. 発表標題<br>ビスマス薄膜の磁気輸送特性評価と2バンドモデル解析 |
| 3. 学会等名<br>第69回応用物理学会春季学術講演会         |
| 4. 発表年<br>2022年                      |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>伊東 輝大, 佐藤 圭, 吉住 年弘, 酒井 政道, 花尻 達郎, 清水 正章, 中村 修, 鷲見 聡, 粟野 博之, 長谷川 繁彦 |
| 2. 発表標題<br>非対称Hall-bar素子を用いた電子正孔補償金属YH <sub>2</sub> におけるスピン拡散長評価              |
| 3. 学会等名<br>第 83 回応用物理学会秋季学術講演会予稿集   |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>伊東 輝大, 佐藤 圭, 増井 拓朗, 酒井 政道, 花尻 達郎, 清水 正章, 中村 修, 鷲見 聡, Sina Ranjbar, 粟野 博之, 長谷川 繁彦                  |
| 2. 発表標題<br>フェリ磁性体Gd <sub>25</sub> Fe <sub>55</sub> Co <sub>20</sub> を用いた補償金属 YH <sub>2</sub> へのスピン注入とホール効果測定 |
| 3. 学会等名<br>第70回応用物理学会春季学術講演会予稿集  |
| 4. 発表年<br>2023年  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

埼玉大学酒井研究室の紹介  
<http://www.fms.saitama-u.ac.jp/lab/sakai/>  
企画特集スピントロニクスの新潮流を期待する両極性伝導体の材料合成・デバイス作製  
[https://nanonet.mext.go.jp/data/doc/1654488745\\_doc\\_10\\_0.pdf](https://nanonet.mext.go.jp/data/doc/1654488745_doc_10_0.pdf)  
分子・物質合成プラットフォーム ユーザーボイス 第27回 酒井 政道  
<https://mms-platform.com/archives/voice/voice27/>

#### 6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                            | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                          | 備考 |
|-------|--|--|----|
| 研究分担者 | 花尻 達郎<br><br>(Hanajiri Tatsuro)<br><br>(30266994)    | 東洋大学・理工学部・教授<br><br><br><br>(32663)            |    |
| 研究分担者 | 粟野 博之<br><br>(Awano Hiroyuki)<br><br>(40571675)      | 豊田工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授<br><br><br><br>(33924) |    |
| 研究分担者 | 長谷川 繁彦<br><br>(Hasegawa Shigehiko)<br><br>(50189528) | 大阪大学・産業科学研究所・招へい准教授<br><br><br><br>(14401)     |    |
| 研究分担者 | 中村 修<br><br>(Nakamura Osamu)<br><br>(60749315)       | 岡山理科大学・研究・社会連携センター・教授<br><br><br><br>(35302)   |    |

#### 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|