



スピンの世界へようこそ！

～スピントロニクスのための磁性の基礎からスピントロニクスの今後まで～

第4部

工博 佐藤勝昭

国立大学法人 東京農工大学名誉教授

独立行政法人 科学技術振興機構 (JST)

さきがけ「次世代デバイス」研究総括



CONTENTS

1. 10:00-12:00 知っているのと得をする磁性の基礎
 2. 13:00-13:45 コイルなしに磁気を電気に変える
 3. 13:50-14:20 コイルなしに電気を磁気に変える
 4. 14:40-15:15 スピン流がパラダイムを変える
 5. 15:20-15:50 スピントロニクス材料
 6. 15:55-16:10 まとめと今後のスピントロニクス
- 16:10-16:30 質疑応答・名刺交換

➤ 質問は各セクションでも受け付けます。

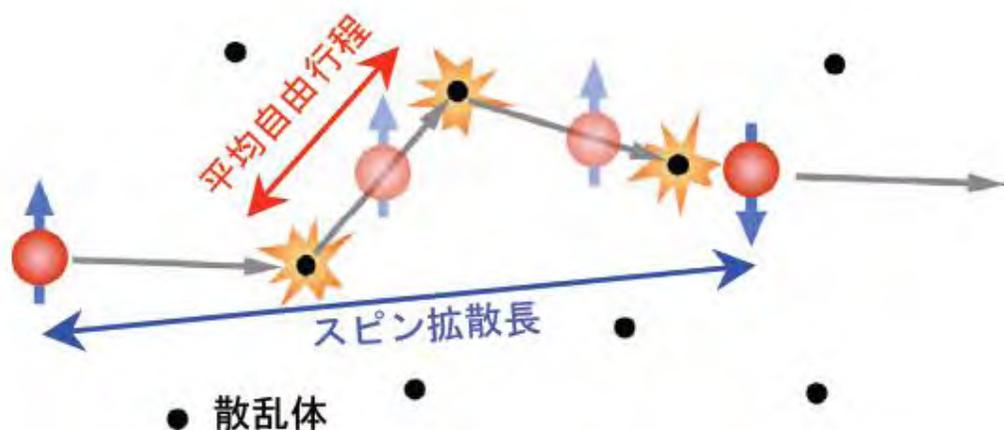


4. スピン流がパラダイムを変える



大きなトピックス：「スピン流」

- ▶ 電荷の流れとしての電流は、平均自由行程(1-10nm)で表される散乱を受けますが、スピンの流れは電子の不純物やフォノンとの衝突の際にあまり散乱を受けないためスピン拡散長は平均自由行程よりかなり長く、強磁性金属で5-10nm、非磁性金属では100nm-1 μ mもあります。



ナノスケールでの
磁気変調構造

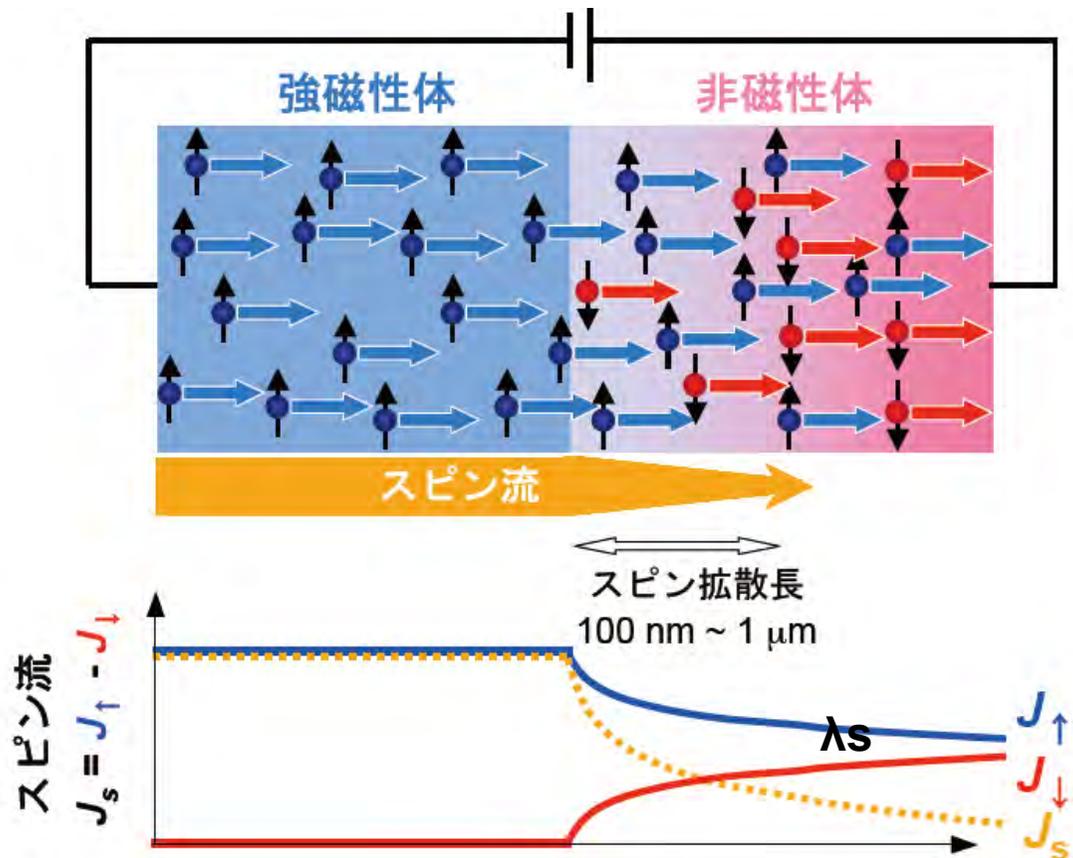
スピン依存伝導
(GMR)

ナノ磁性と密接不可分

図は東北大高梨弘毅先生のご厚意による



(1) 電流を伴うスピンの流

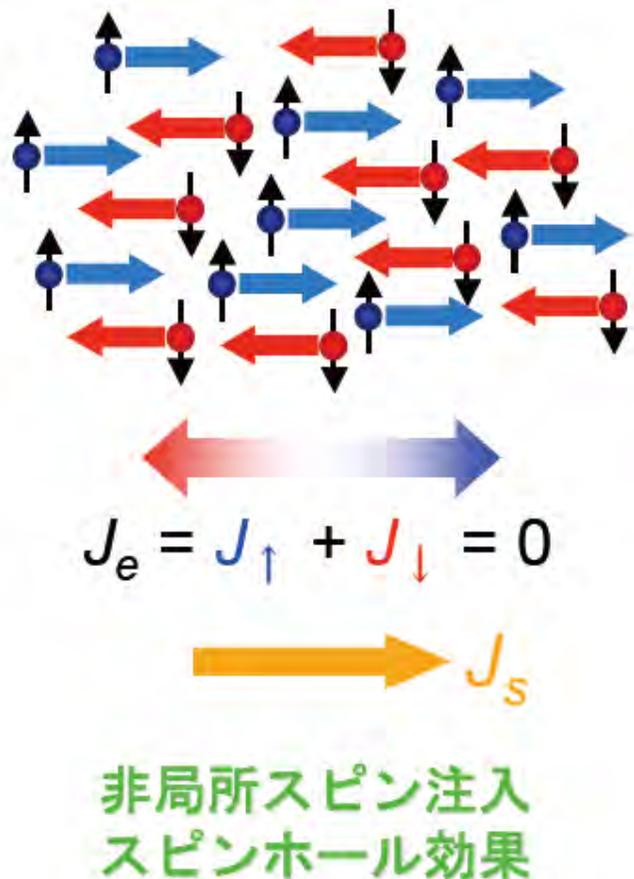


- ▶ 非磁性体の中では本来 \uparrow スピンと \downarrow スピンの電子の数は等しいのです。
- ▶ 強磁性体から \uparrow スピンをもつ電子が非磁性体への移動すると、界面からスピン拡散長 λ_s 離れたところまでは \uparrow スピンの数と \downarrow スピンの数がアンバランスな状態が生じます。
- ▶ このことをスピン注入が起きているといいます。

図は東北大高梨弘毅先生のご厚意による



(2) 電流を伴わないスピンの流れ：純粹スピン流



- ▶ ↑スピンの電子が右方向に進み↓スピンの電子が左方向に進むとすれば、電荷の流れとしての電流はゼロです。この場合ジュール熱による損失は発生しません。
- ▶ ここで、スピンだけを見ると、↑スピンは右側に、↓スピンは左側に流れますから、 $J_{\uparrow} - J_{\downarrow}$ で定義されるスピン流は右に向かって流れるのです。
- ▶ 純粹スピン流を用いれば、伝搬損失なしに情報が伝送できます。

図は東北大高梨弘毅先生のご厚意による



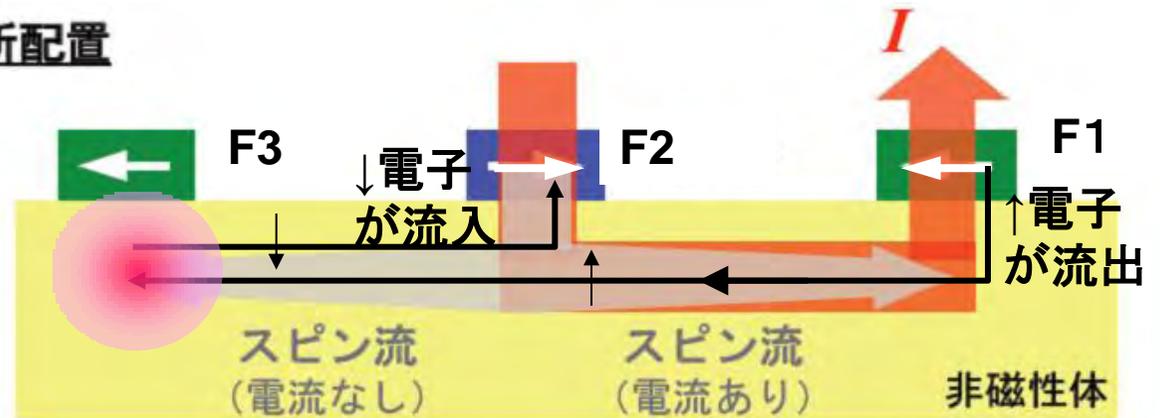
スピン流の特徴と応用

- ▶ ふつうの電流は保存量です。回路をつくと必ず戻ってきます。
- ▶ 一方、スピン流は、上向きスピンの流れと下向きスピンの流れの差なので、スピンを注入してもいつかは緩和してしまいます。
- ▶ スピン緩和長は数10nmからサブ μ m程度なので、ずっと前の電磁気学においては、考慮する必要のない量として無視されていました。
- ▶ 最近になってスピン緩和長と同程度かそれ以下のサイズのデバイスが当たり前になってくると、スピン流を無視できなくなりました。
- ▶ それどころか、スピン流を積極的に利用しようというのが、スピントロニクス新しい流れなのです。
- ▶ 前のスライドで述べたように純粹スピン流を用いれば、電流によるジュール熱の損失なしに情報伝送ができるはずだからです。



スピン流を作る

非局所配置



- ▶ 非磁性体に、3つの強磁性電極をつけて、F2の磁化はF1に反平行、F3の磁化はF1に平行としましょう。
- ▶ このとき、F2からF1に電流を流すと、F1から非磁性体に注入された \uparrow スピン電子はF2には入れませんからF2・F3間に流れ出します。
- ▶ それでもF2からF1に電流を流さなければなりませんから、F2・F3間から \downarrow スピン電子が流れ込みます。この結果、F2・F3間には正味の電流は流れませんが、スピン流($J_{\uparrow} - J_{\downarrow}$)は左に流れます。
- ▶ この結果、F3付近には**スピンの蓄積**が起きます。

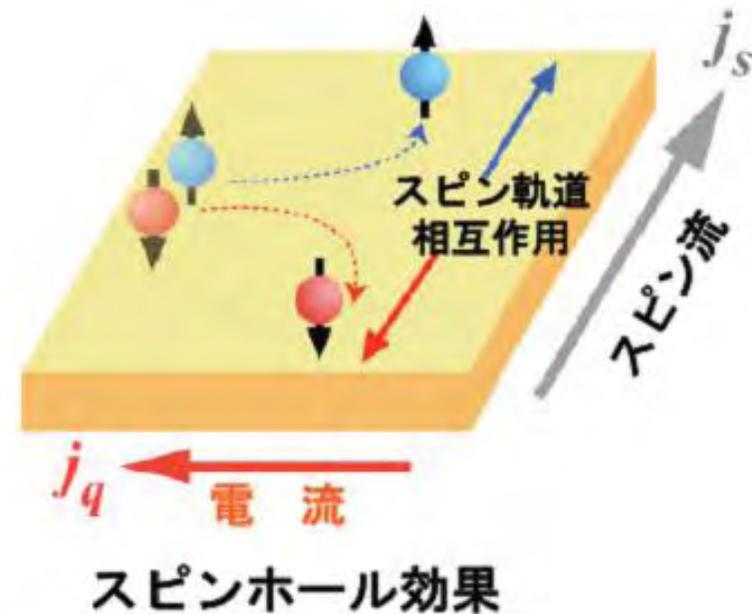
東北大高梨弘毅先生の作られた図に書き加えました。



スピン流を観る

(1) スピンホール効果(SHE)

- ▶ スピン流の性質を端的に表しているのがスピンホール効果です。
- ▶ 普通のホール効果は**磁界下に置かれたキャリア**がローレンツ力で電流に垂直な方向に曲げられる効果です
- ▶ スピンホール効果では、電流が流れるだけで、スピン軌道相互作用の効果で**↑スピン**と**↓スピン**が左右に分離され、**電流 j_q** と垂直方向に**スピン流 j_s** を生じるのです。



S. Murakami, N. Nagaosa, S.C.
Zhang: Science 301 (2003) 1348.

図は東北大高梨弘毅先生のご厚意による



スピン流を観る

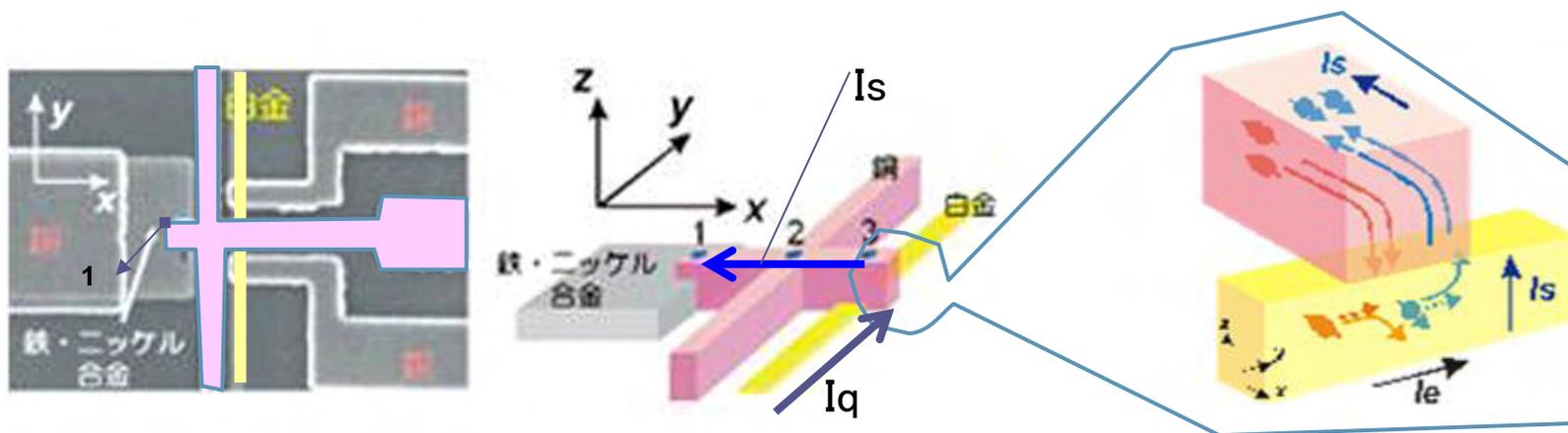
スピンホール効果－歴史的背景

- ▶ スピンホール効果のアイデアは、1970年代初めにロシアの研究者によって提唱されていました [1] が、実証されてはいませんでした。
- ▶ 2003年になり、村上・永長によって理論的に説明され、検証が可能な大きさであることが予言されました。[2]
- ▶ スピンホール効果の最初の実験的検証は、2004年、アメリカのAwschalomのグループにより、磁気光学効果を用いて行われました。[3]
- ▶ その後、2006年にデバイス構造を用いて電氣的に検証されました。[4]
 - ▶ [1] M. I. Dyakonov and V. I. Perel: Sov. Phys. JETP Lett. 13 (1971) 467; M.I. Dyakonov and V.I. Perel: Phys. Lett. A **35** (1971) 459.
 - ▶ [2] S. Murakami, N. Nagaosa, S.C. Zhang: Science **301** (2003) 1348.
 - ▶ [3] Y.K. Kato, R.C. Myers, A.C.Gossard, D.D. Awschalom: Science **306** (2004) 1910.
 - ▶ [4] S.O.Valenzuela and M. Tinkham: Nature 442 (2006) 176.



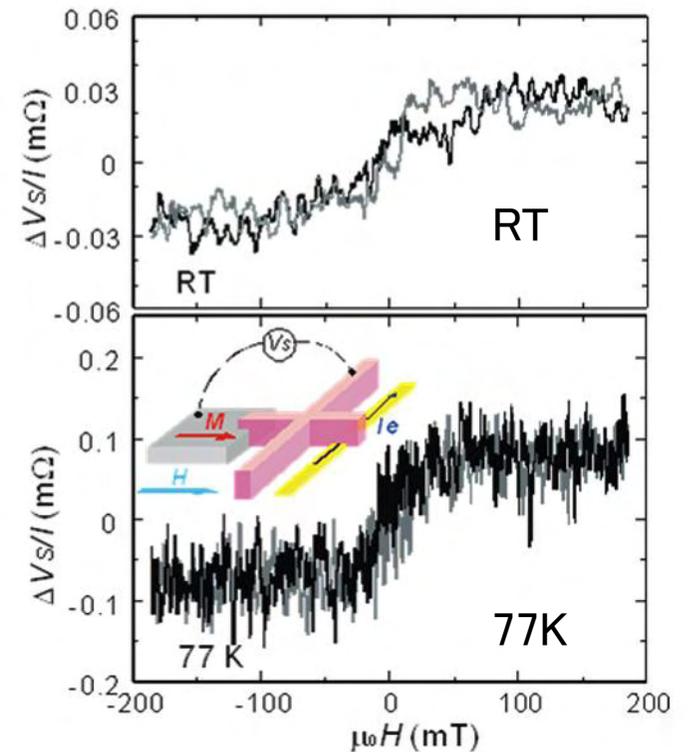
スピンホール効果の実験

- ▶ 白金細線に電流 I_q を流すと電流と垂直にスピン流が生じスピン蓄積が生じます。
- ▶ このスピン蓄積を検出するため、白金細線の上部に銅細線をスピン蓄積情報の引き出し線として接続します。
- ▶ これにより、銅細線内にもスピン蓄積が誘起されます。スピン蓄積の大きさは、それぞれ蓄積した上向きスピンと下向きスピンの数密度で与えられる化学ポテンシャルの差に相当します。



スピンホール効果の検出結果

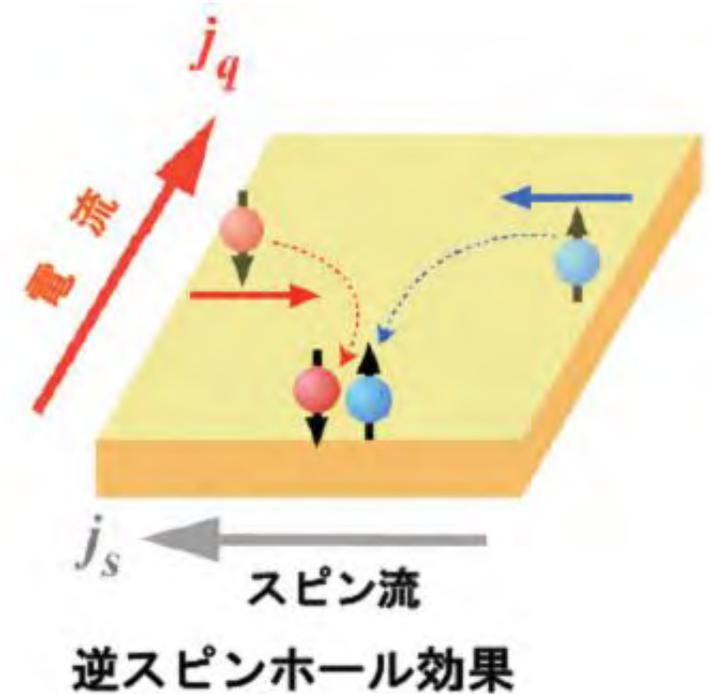
- ▶ 図は、スピンホール効果による電圧 ΔV を白金細線に流す電流 I で割ったスピンホール抵抗を磁界に対してプロットしたものです。上が室温、下が77 Kです。
- ▶ 磁界をx軸正方向に加えてパーマロイの磁化をスピン分極と平行に配向させると抵抗が最大に、また、負方向に加え磁化を反転させると抵抗が最小になります。
- ▶ このように、白金細線のスピンホール効果によって、銅細線にスピン分極が生じていることが確認できます。
- ▶ スピンホール伝導率は $2.4 \times 10^4 (\Omega \text{ m})^{-1}$ となり、これまでに報告されている半導体の値に比べて一百万倍以上も大きい値です。
- ▶ 室温でこのような大きな値が得られたことは、スピンホール効果で発生するスピン流を、現実のスピン트로ニクス素子に将来的に十分適用できる可能性があることを示しています



スピン流を観る

(2) 逆スピンホール効果(ISHE)

- ▶ スピンホール効果と逆にスピン流 j_s を流すと、垂直方向に電流 j_q が流れる効果があります。
- ▶ スピン軌道相互作用の効果で↑スピンは左に、↓スピンは右に曲げられます。その結果、スピン流 j_s と垂直方向に電流 j_q が生じるのです。
- ▶ この効果を使うと、何らかの方法で作りに出されたスピン流を電流に変えて読み出すことができます。
- ▶ 齊藤らは、ISHEを用いて、絶縁体を通ってきたスピン流を検出しました。

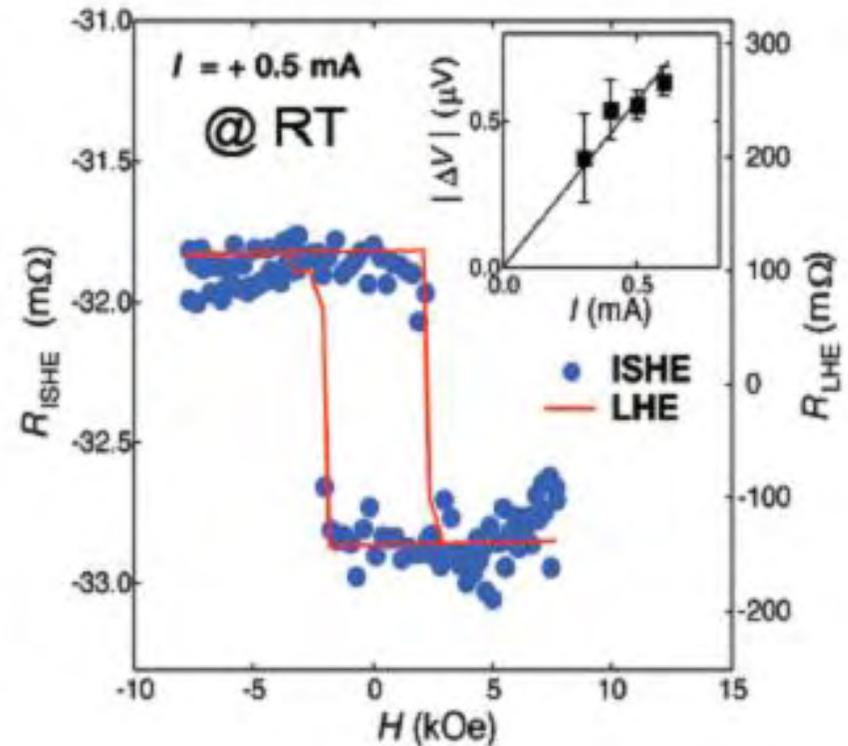
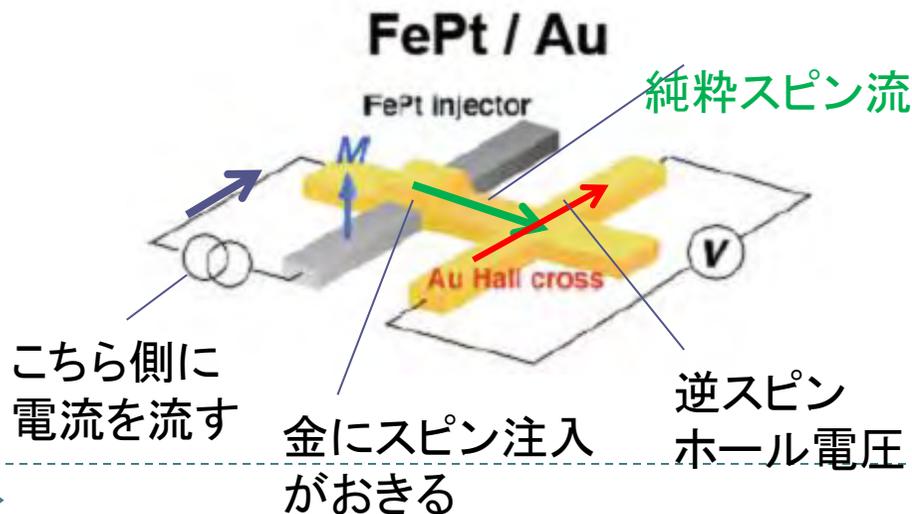


図は東北大高梨弘毅先生
のご厚意による



逆スピホール効果の実験

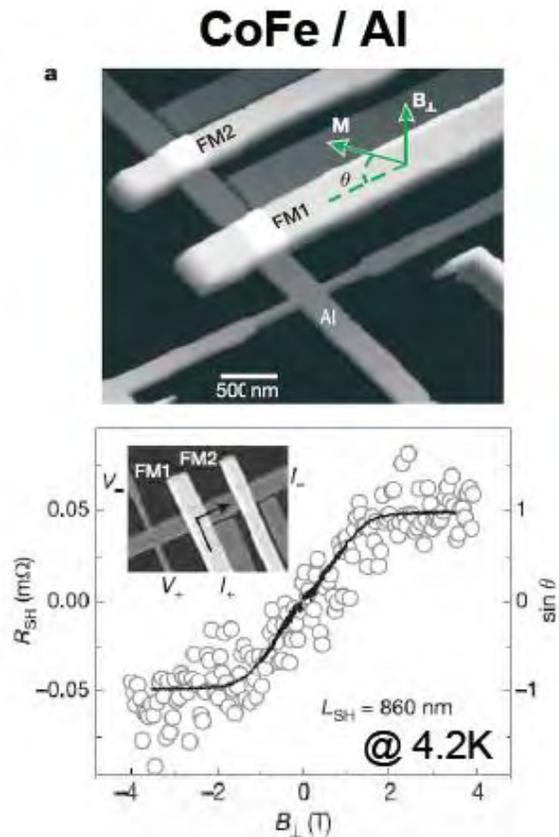
- ▶ 非局所配置において、磁性金属から非磁性金属にスピン流を流すと、逆スピホール効果のために直交する金属の両端に電圧が生じます。



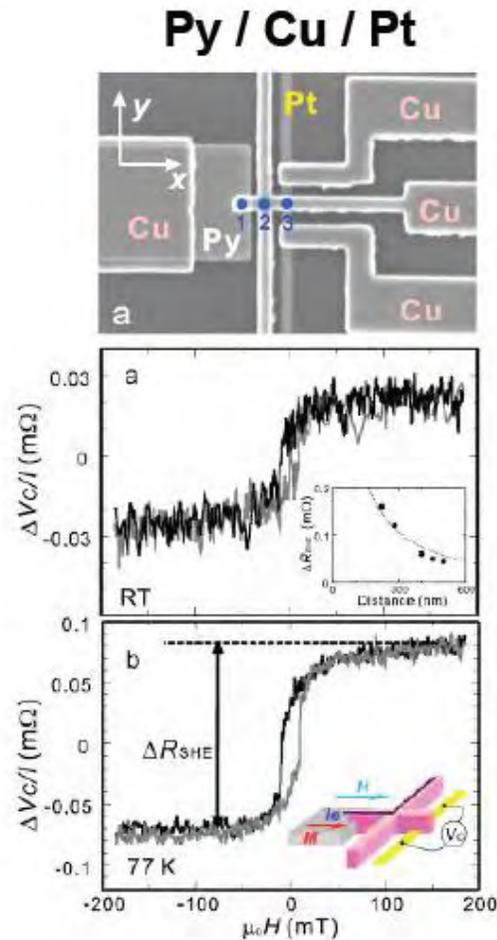
Auにおいて大きなISHEが生じる理由は、Auに含まれる不純物のためであるとされる。



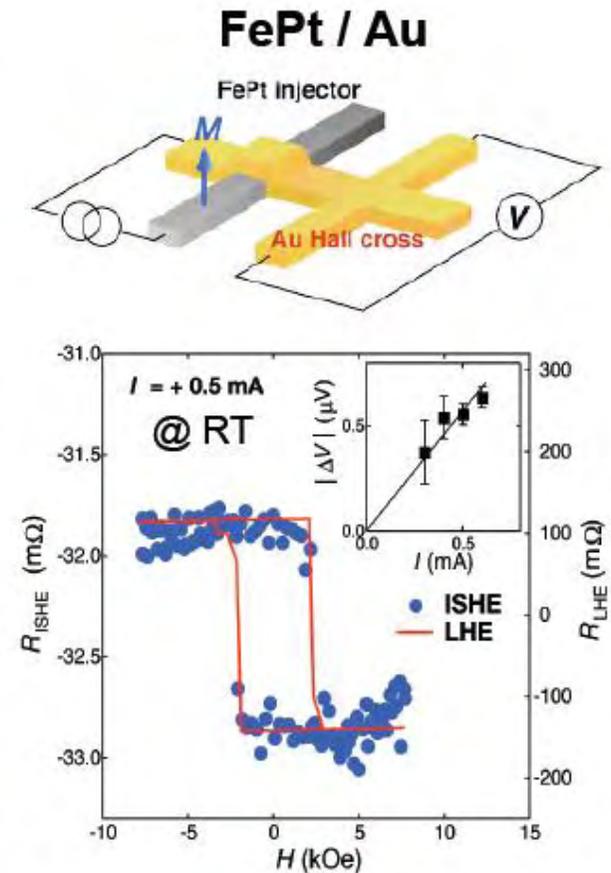
スピンホール効果：最近の実験結果



S. O. Valenzuela, M. Tinkham,
Nature **442**, 176 (2006).



T. Kimura *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*,
98, 156601 (2007).



$$\alpha_H \sim 0.1$$

T. Seki *et al.*, **14pC-11**

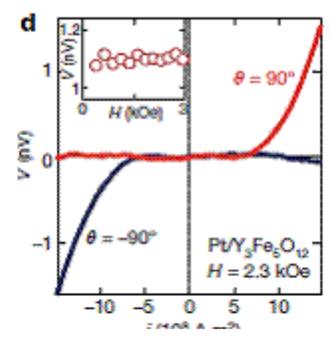
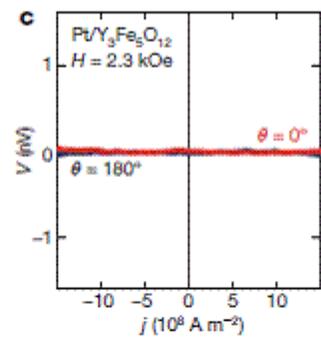
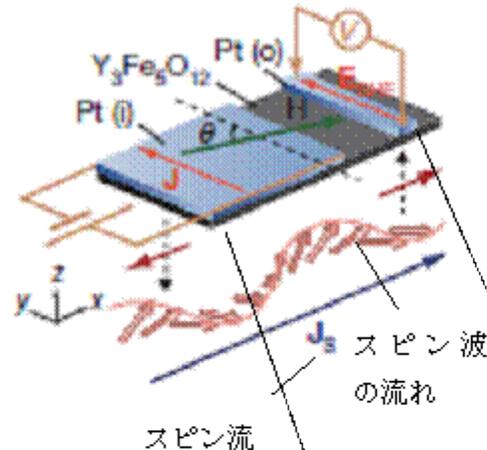
スピン流物性－最近の話題から

- ▶ 絶縁体がスピン流を介して電気を通す
- ▶ スピンゼーベック効果 金属
- ▶ スピンゼーベック効果 絶縁体
- ▶ トポロジカル絶縁体による熱電変換
- ▶ カーボンスピントロニクス
- ▶ シリコンスピントロニクス
- ▶ 高スピン分極率スピン源 ハーフメタルの開発
- ▶ チューナブルスピン源 電流制御相転移



絶縁体がスピン流を介して電気を通す

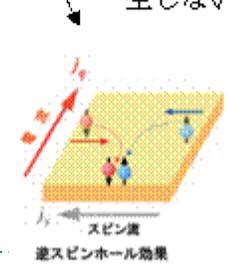
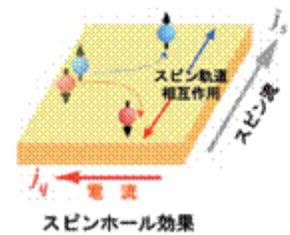
- ▶ 2010年、齊藤らは、絶縁体であるYIG(イットリウム鉄ガーネット)に2つの白金電極をつけ、一方の白金電極に直流の電流を流すと、もう一方の白金電極に直流電圧が現れることを発見しました。



磁界がスピン流 J_s に平行だと白金電極 Pt(o)に起電力は生じない

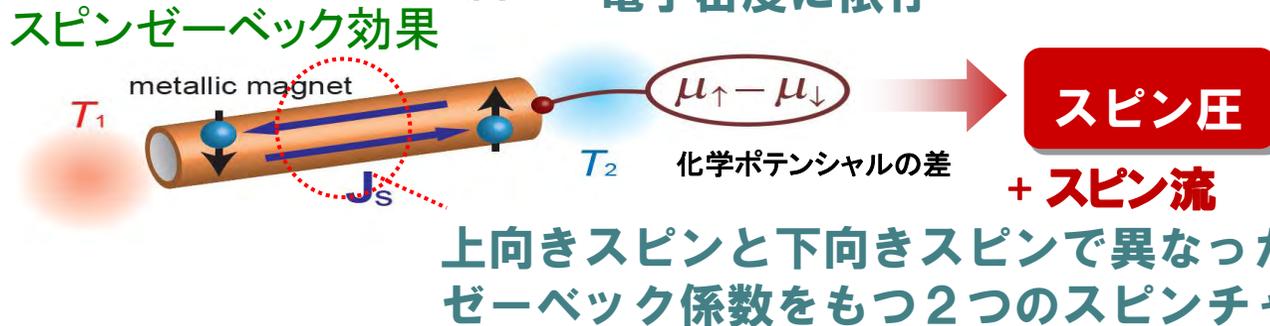
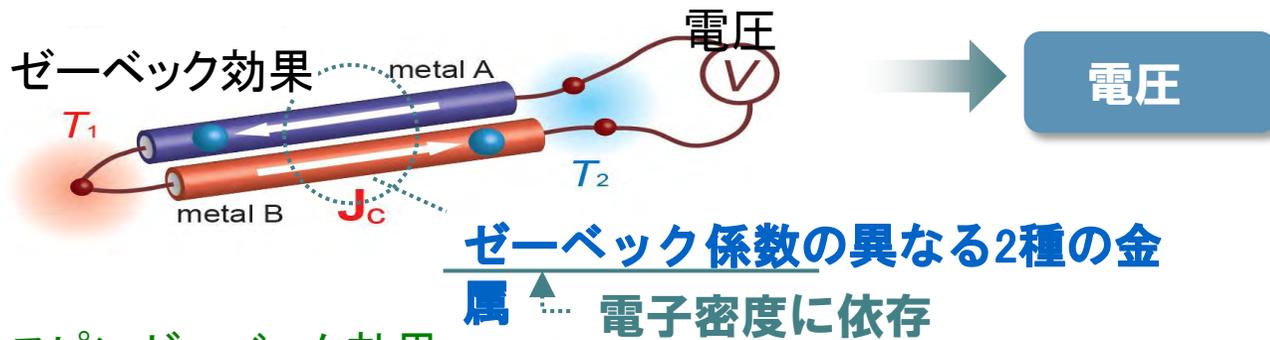
磁界がスピン流 J_s に垂直だと Pt(o)に起電力が生じる。
+90 度だと第1白金電極 Pt(i)を流れる電流の向きが図の矢印の時のみ生じる

Y. Kajiwara, K. Harii, S. Takahashi, J. Ohe, K. Uchida, M. Mizuguchi, H. Umezawa, H. Kawai, K. Ando, K. Takanashi, S. Maekawa & E. Saitoh, Nature **464** 262 (2010)



スピン流と熱流: スピンゼーベック効果 (1) 金属

- ▶ 齊藤らは、温度勾配をつけた金属磁性体において、熱スピン流が発生することに着目、両端にスピン蓄積があるはずだと考え、白金電極の逆スピンホール効果を用いて、スピン圧(上向き電子の化学ポテンシャルと下向き電子の化学ポテンシャルの差)の測定に成功しました。彼はこれをスピンゼーベック効果と名付けました。

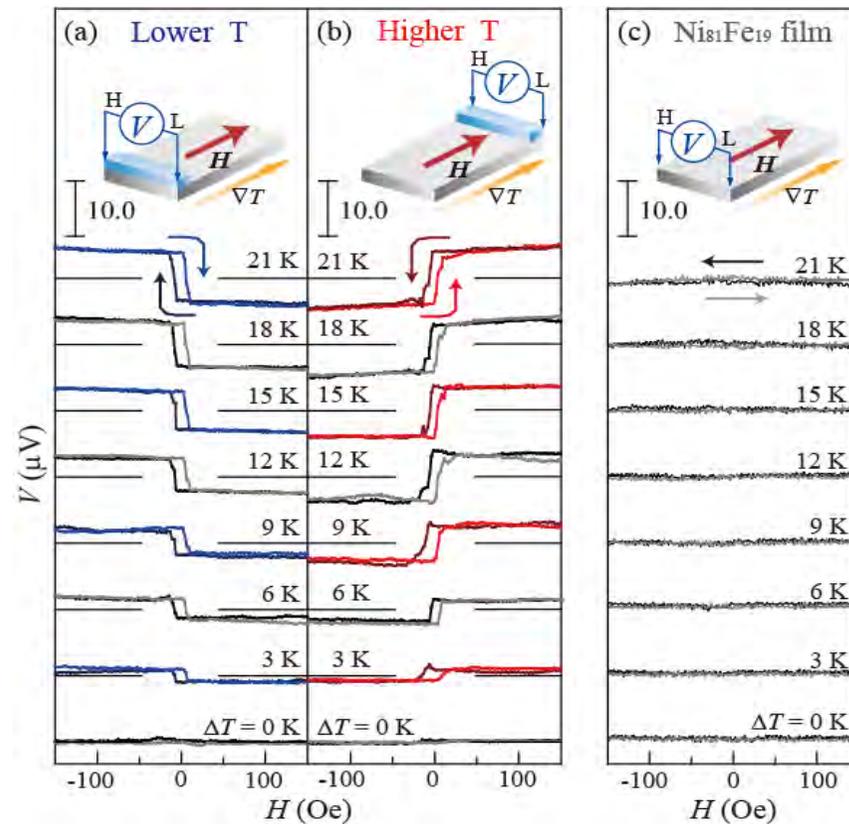
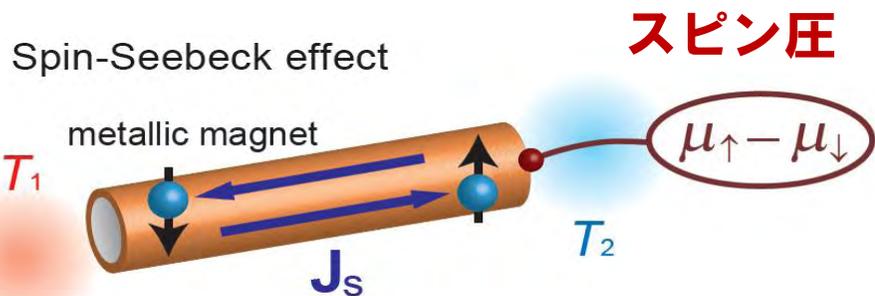


K. Uchida, E. Saitoh, et al.: Nature 455 (2008) 778.



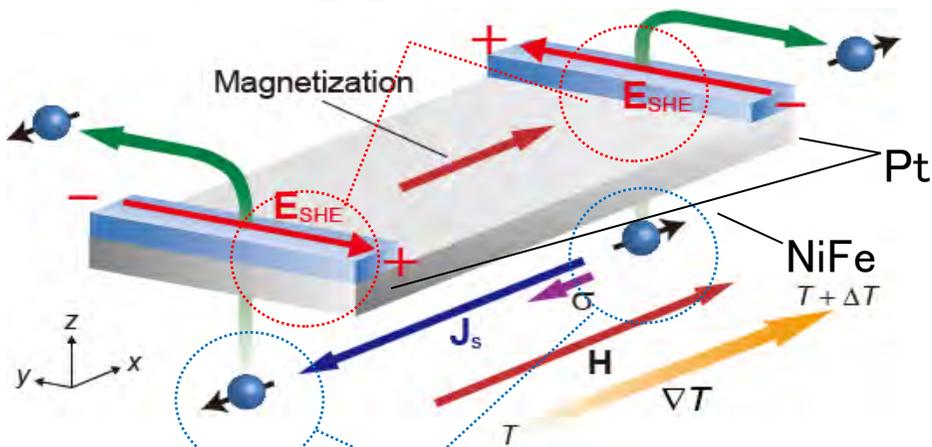
パーマロイ (NiFe) のスピンゼーベック効果の観測

スピンゼーベック電圧の磁界依存性



逆スピンホール効果 (ISHE)

両端で起電力の符号が異なる



両端で異なるスピン圧の符号

スピンゼーベック効果による
逆スピンホール電圧

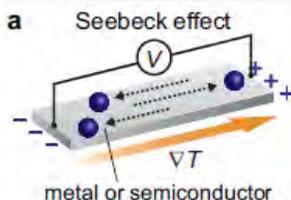
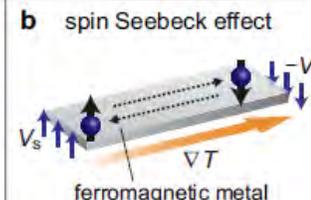
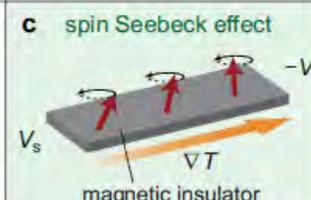
K. Uchida, E. Saitoh, et al.: Nature 455 (2008) 778.

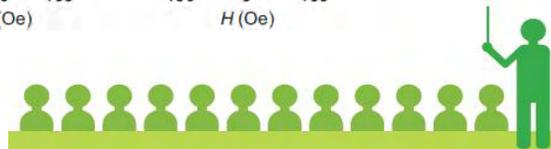
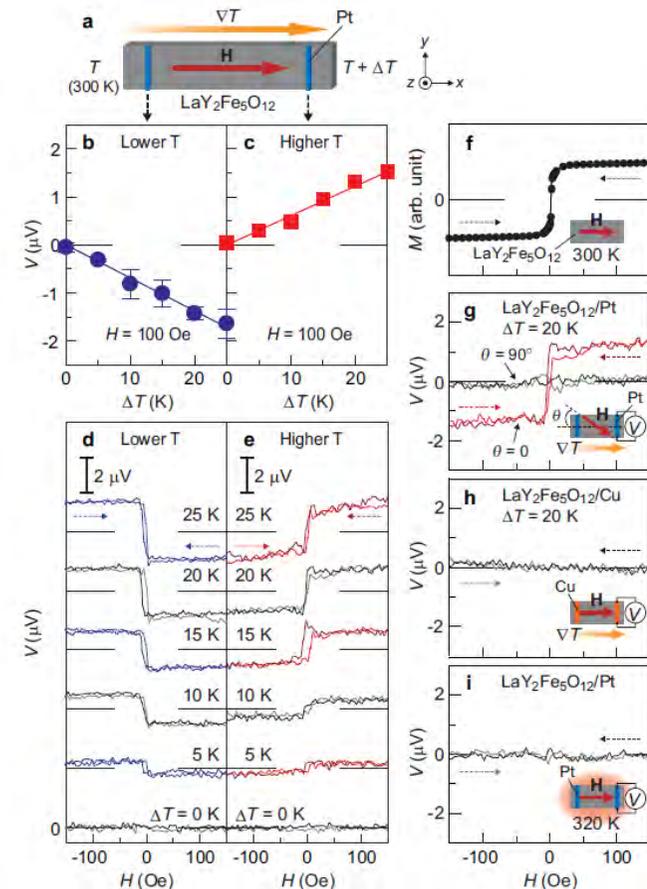
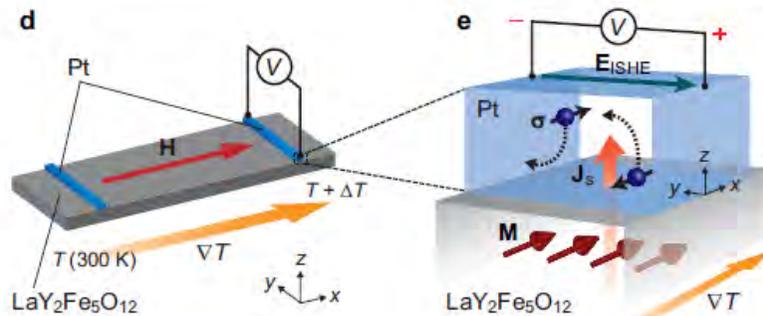


スピン流と熱流: スピンゼーベック効果 (2) 絶縁体

- 齊藤らは絶縁性の磁性体 $\text{LaY}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ においてもスピンゼーベック効果を観測しました。

K. Uchida, E. Saitoh et al.:
Nature Mat. (online Sept 27, 2010)

output	伝導性	磁性
Material		
導体	a Seebeck effect  metal or semiconductor	b spin Seebeck effect  ferromagnetic metal
絶縁体	×	c spin Seebeck effect  magnetic insulator



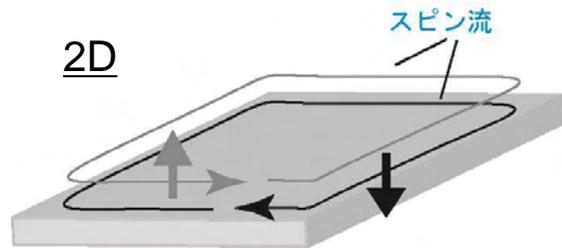


スピン流と熱流: トポロジカル絶縁体の熱電効果

- 1) ビスマスの超薄膜は量子スピンホール相と考えられる
- 2) 2次元・3次元量子ホール(QSH)相に対する一般化した相図を作成
- 3) 量子スピンホール系材料は、高効率熱電変換材料の候補である。

予想 : QSH 系は高効率熱電材料になり得る.

- * 電子伝導を保ちながらフォノン伝導を抑える。
- * 低次元系(エッジ状態, 表面状態)
- * 類似材料が含まれる($\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$, Bi_2Se_3 etc.)

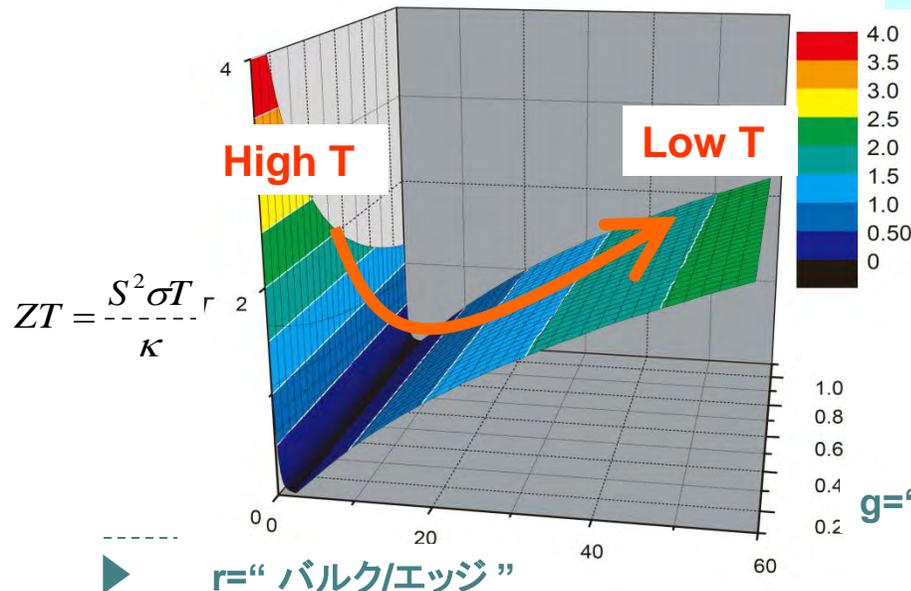


結果

- 低温
 - エッジ状態において非弾性散乱長が長い
 - エッジ状態が多数を占める
 - 熱輸送のバルクからエッジへのクロスオーバー
- QSH系の超薄膜・ナノリボン
 - クロスオーバーは10K付近でおきる

QSH系は低温で優れた熱電材料になる

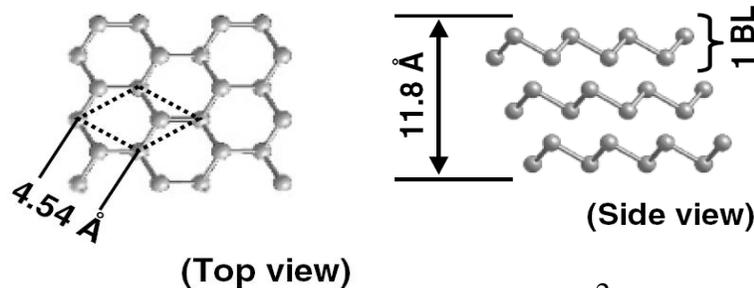
$g = \text{“フォノン伝導/バルク伝導”}$



トポロジカル絶縁体 ビスマスの量子スピンホール効果

- ▶ バルク Bi は半金属, エッジは金属.
- ▶ **Bi 超薄膜では?**

(111) 1-bilayer = QSH相

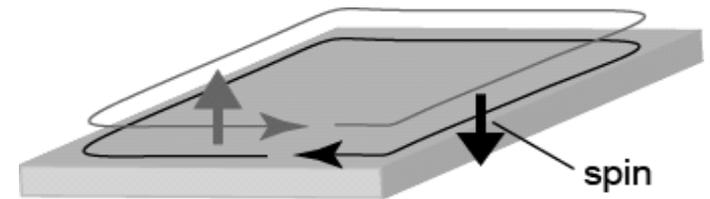


$$ZT = \frac{S^2 \sigma T}{K}$$

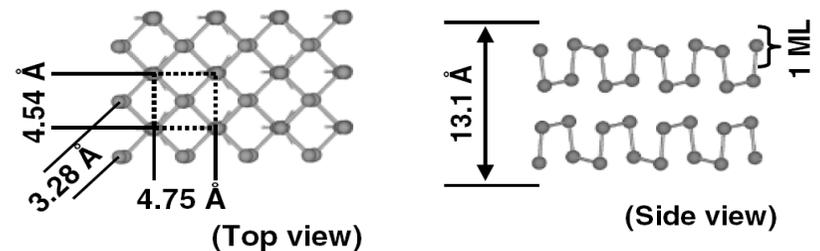
熱電性能指数

理想モデル(エッジにおける完全導体)

- ・ QSH相においては, 熱電変化の性能指数 ZT はエッジとバルクの比で決まる.
- ・ **化学ポテンシャルがバンド端に近いと ZT が大きい.**
- ・ 系の長さが長いと ZT が大きい. ← エッジ状態が ZT を決める.
- ・ ZT は温度とともに増加. ← 高いエネルギーをもつキャリアが ZT に寄与.



{012} 2-monolayer = 絶縁層



カーボンスピントロニクス

- ▶ フラーレン、グラフェン、ルブレンなどは、スピン軌道相互作用の小さな炭素から構成されるので、スピン拡散長がきわめて長いと考えられ、大きなMR効果、スピン蓄積効果が期待されます。
- ▶ 数年前までに報告されていたナノカーボンのスピントロニクスは、測定法に問題がありました。
- ▶ 白石らは、単層グラフェンにおいて、非局所測定を用いて、正確で再現性のよい磁気抵抗効果を見だし、カーボンスピントロニクスの分野における標準を提供しました。

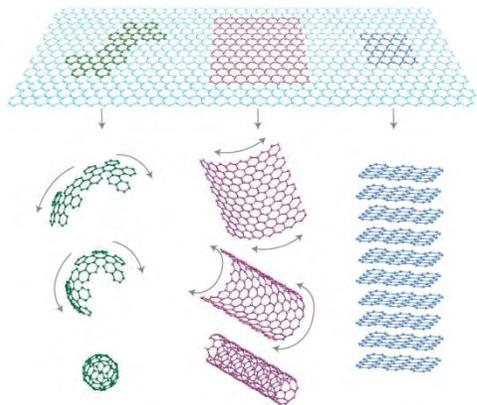


グラフェンスピントロニクス



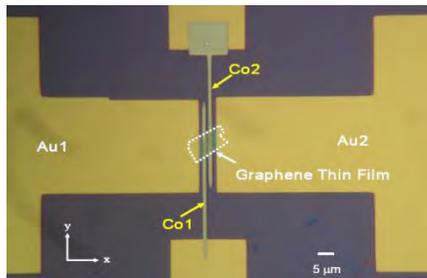
Masashi Shiraishi

Graphene

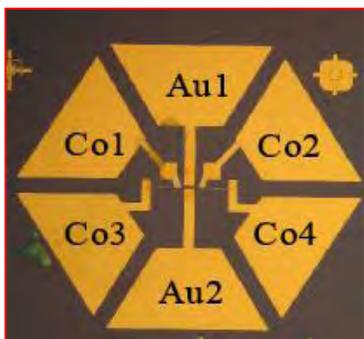


室温で

1. 純粋スピン流生成
2. グラフェンへのスピン注入を行う。

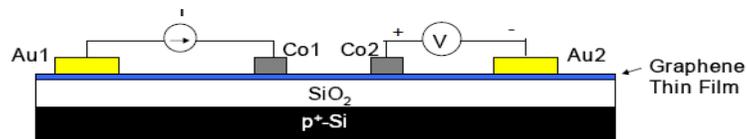


単層グラフェンにおけるスピン信号のゲート変調

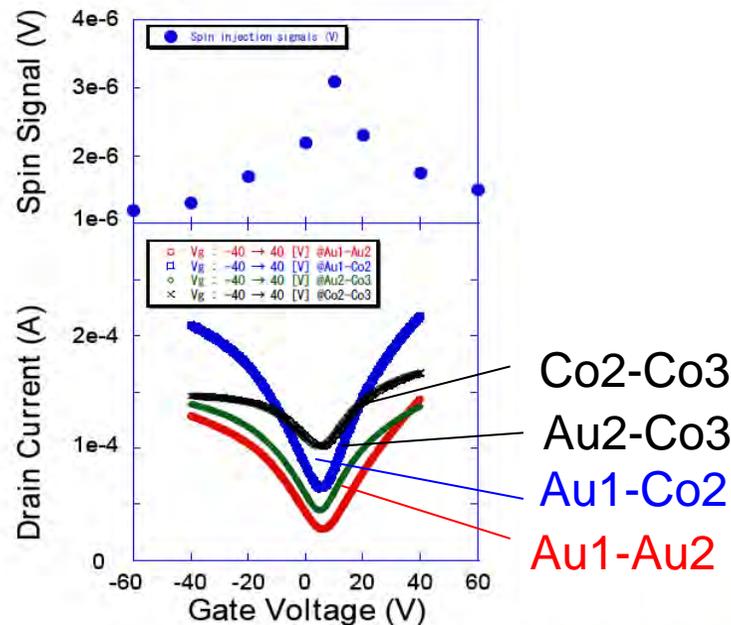
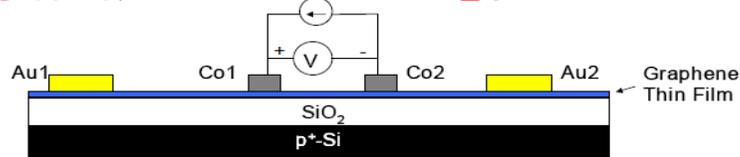


N. Mitoma,
M. Shiraishi, et al.,
in preparation.

非局所測定 \Rightarrow 純粋スピン流!!



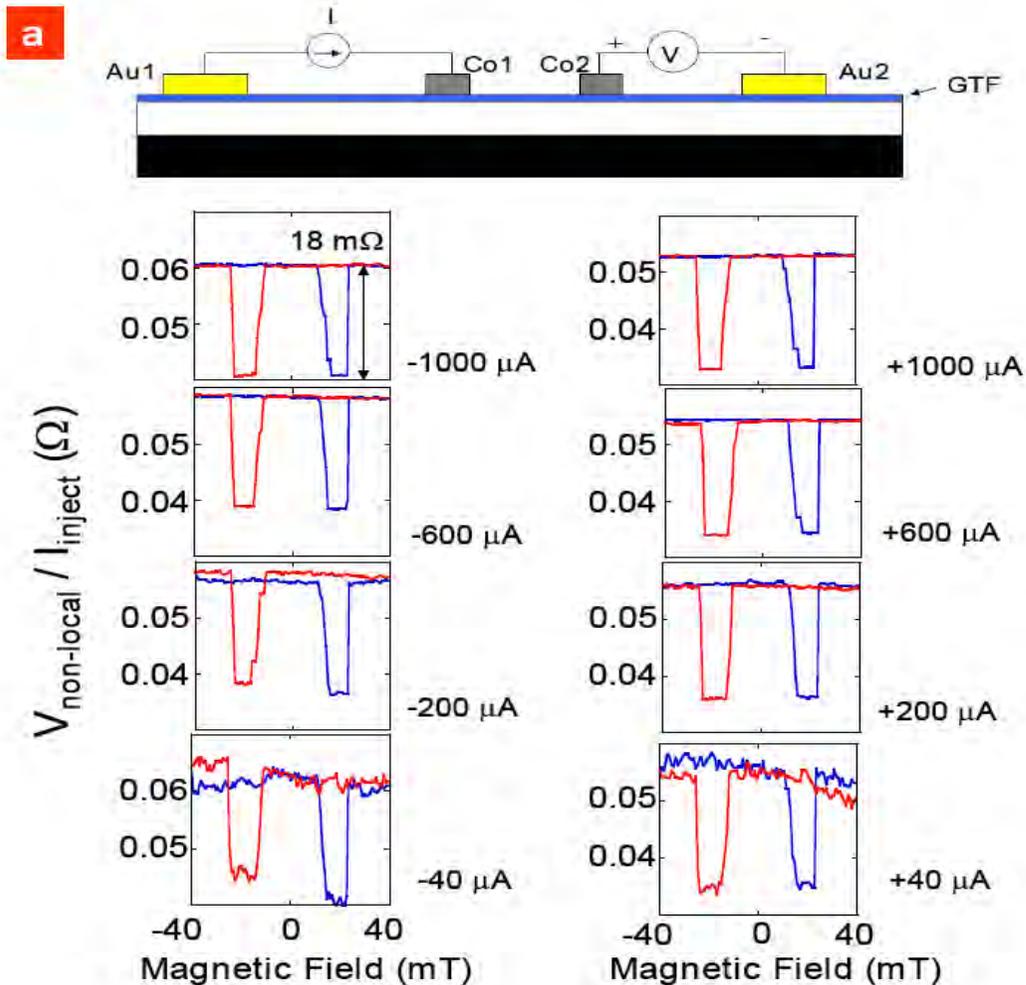
局所測定 \Rightarrow 電極のAMRが重畳



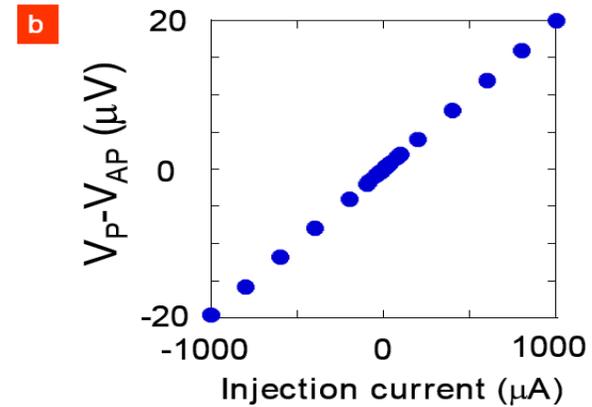
Co2-Co3
Au2-Co3
Au1-Co2
Au1-Au2



グラフェンスピントロニクス

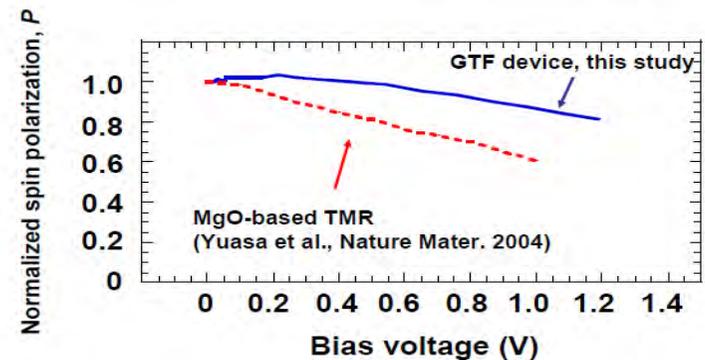


スピン分極率は注入電流に寄らない。



$$\Delta V_{\text{non-local}} = \frac{2P^2}{(1-P^2)^2} \left(\frac{R_F}{R_N} \right) R_F \cdot \left[\sinh\left(\frac{L}{\lambda_{sf}} \right) \right]^{-1} \cdot I_{\text{inject}},$$

MgO-TMRに比べてバイアス依存性が少ない



M. Ohishi, M.S. et al., JJAP 46, L605 (2007).

M. Shiraishi et al., Adv. Func. Mat., in press.

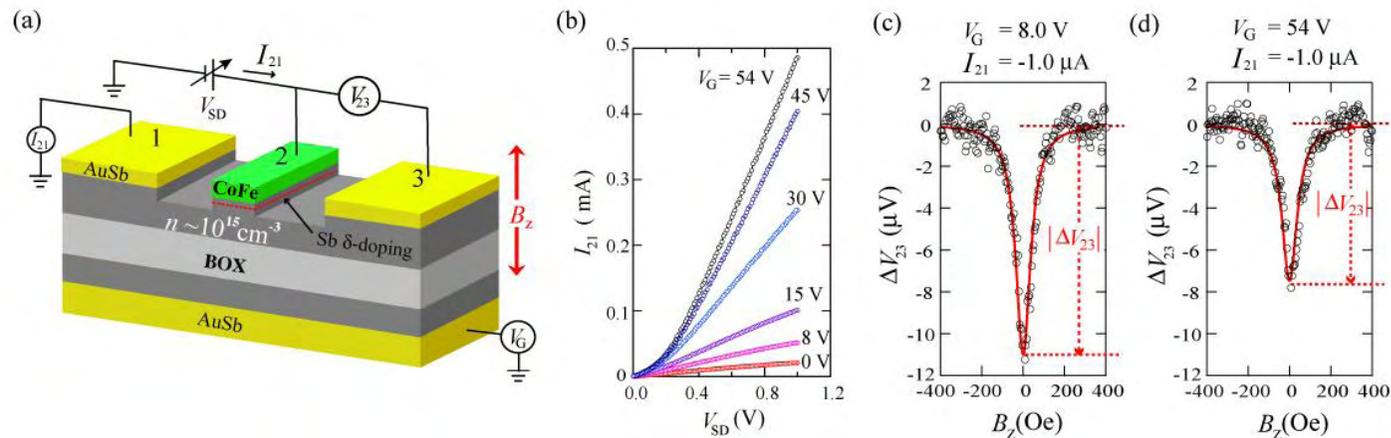
▶ K. Muramoto, M.S. et al., in preparation.





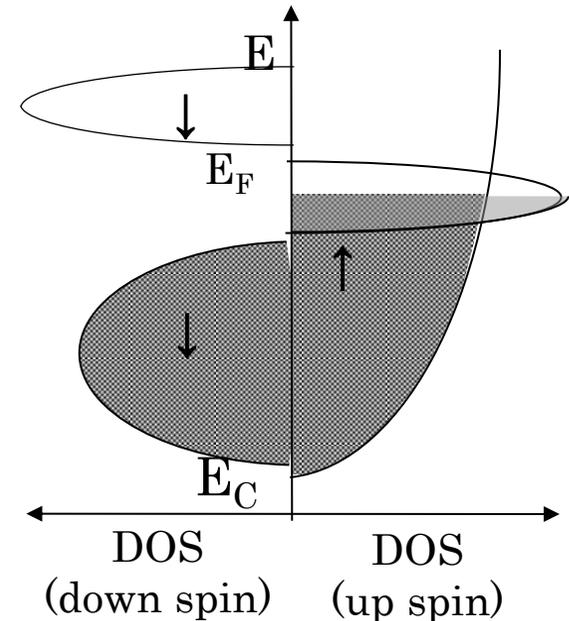
シリコンスピントロニクス

- ▶ スピントロニクスの実用化のためには、現行のシリコンテクノロジーとの融合が必要です。
- ▶ これまでのシリコンスピントロニクス研究では、高濃度ドーピングした金属的なシリコンがつかわれていました。これでは、ゲート制御など半導体としての特性を活かすことができません。
- ▶ 浜屋らは、低ドーピングで半導体的シリコンを使って、スピン注入する技術を開発、ゲート制御にも成功しました。



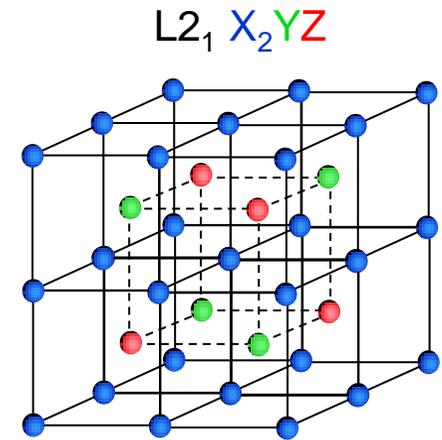
スピン源

- ▶ スピントロニクスに使う電極は、室温で大きなスピン分極率 P をもつことがのぞましいのですが、 $P=1$ のものはありません。
- ▶ さまざまな磁性体の中で、上向きスピンは金属であるが下向きスピンは半導体であるような一連の物質がありハーフメタルと呼ばれており理想的には $P=1$ のスピン分極率が期待されます。
- ▶ 歴史的には、ハーフホイスラー合金であるPtMnSbなどのバンド計算から提唱され、実験的に検証されました。
- ▶ フルホイスラー合金、マグネタイト、2酸化クロムなどが候補としてあげられています。



高スピン分極率フルホイスラー合金の探索

- ▶ 歴史的には、ホイスラー合金は、F.Heuslerが発明したCu,Mn,Alを含む合金で、強磁性でない金属を組み合わせて強磁性体をつくったとして有名です。
- ▶ バンド計算によると、組成式 X_2YZ をもつフルホイスラー合金のうちXとしてCoを含み、YとしてFe,Mnなどを含むL10構造の合金がハーフメタルになるとされています。
- ▶ 理想的には X_2YZ の元素X,Y,Zが図のように配置されればL10構造になるのですが、YとZが無秩序になるとB2構造、X,Y,Zが無秩序になるとA2構造となりこの順にPが低下します。

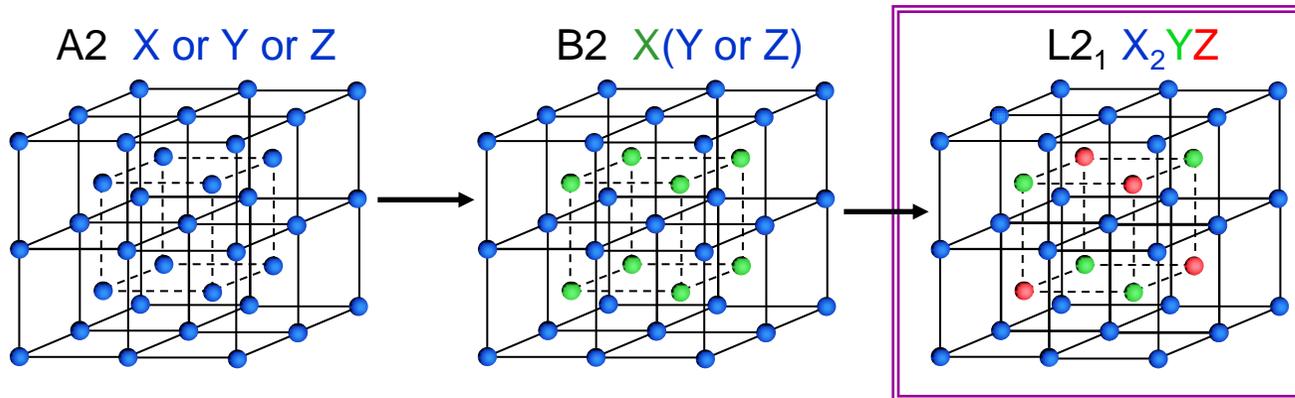


理論計算に基づく材料探索



Y.K. Takahashi

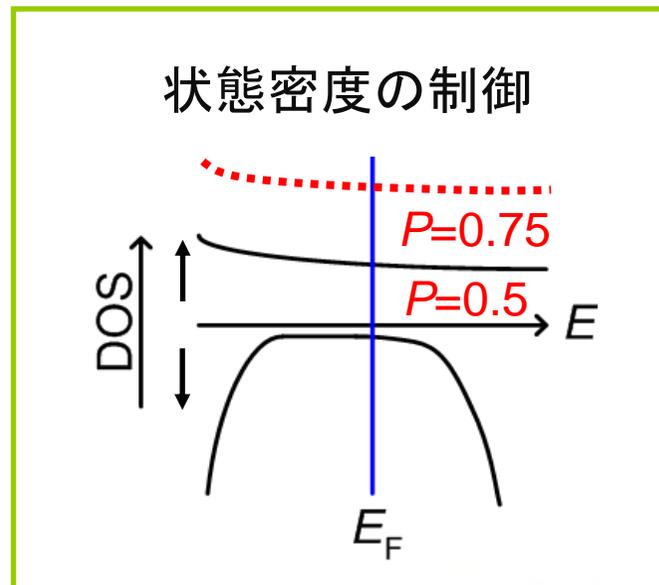
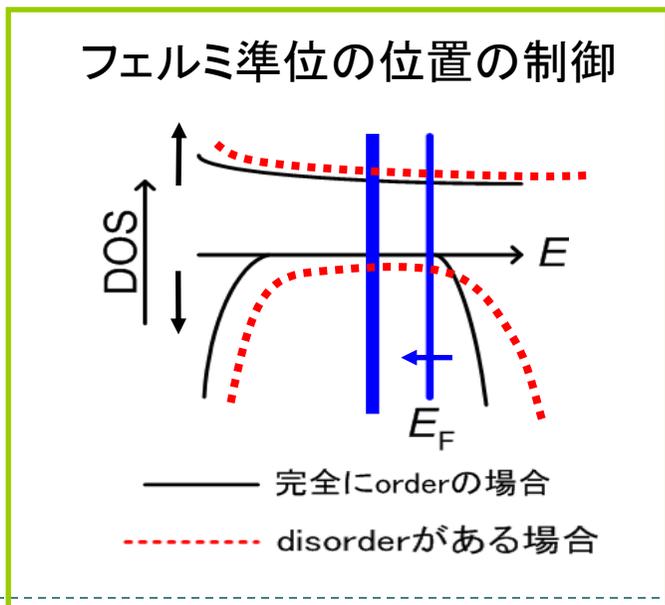
▶ Co系フルホイスラー合金、 X_2YZ



高いキュリー温度
理論分極率 $P=1$

しかし、
 P の実験値は低い

探索方針



PCARS法によるスピン分極率評価

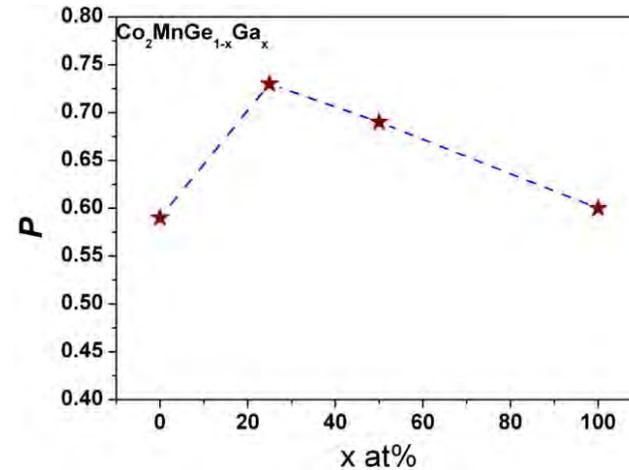
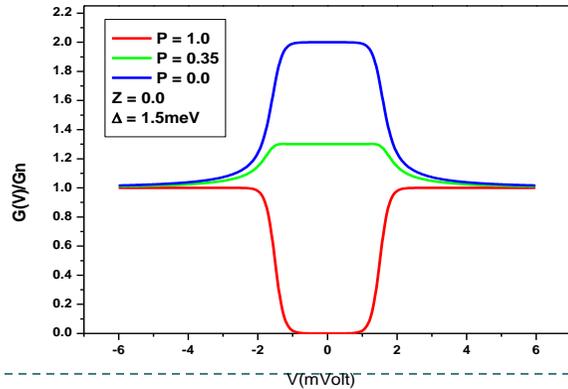
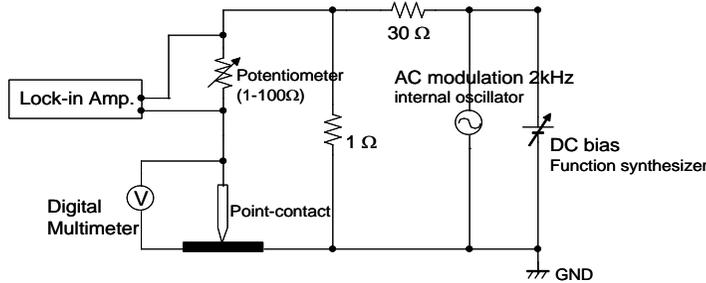
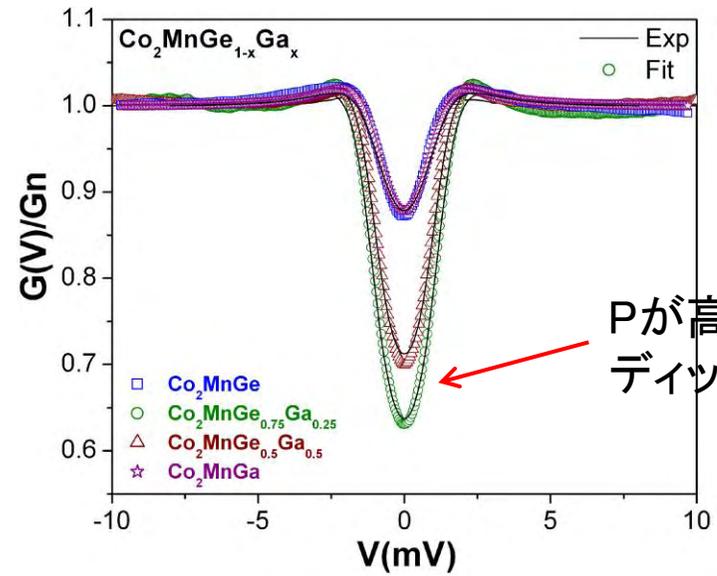
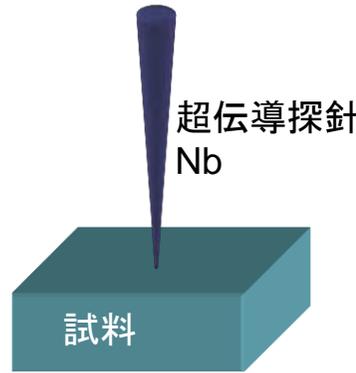
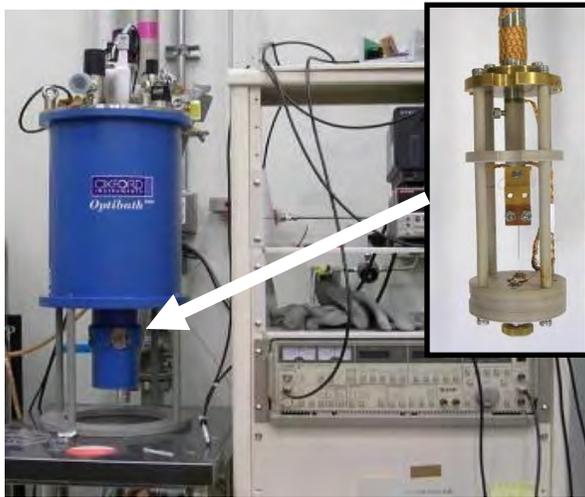
高橋は20種類のホイスラー合金を含む32種類の磁性体についてPを測定し、CoMnGeGa合金において最も高い74%という高いP値を得ました。

元素と2元合金	P
Fe	46
Co	45
FeCo	50
Co ₇₅ Fe ₂₅	58
B2-FeCo	60
[Co/Pd] _n	60

3元合金	P
Co ₂ MnSi	56
Co ₂ MnGe	58
Co ₂ MnSn	60
Co ₂ MnAl	60
Co ₂ MnGa	60
Co ₂ CrAl	62
Co ₂ FeAl	59
Co ₂ FeSi	60
Co ₂ FeGa	58
Co ₂ CrGa	61
Co ₂ TiSn	57
Co ₂ VAl	48
Fe ₂ VAl	56

4元合金	P
Co ₂ Mn(Ge _{0.75} Ga _{0.25})	74
Co ₂ Mn(Ga _{0.5} Sn _{0.5})	72
Co ₂ Fe(Si _{0.75} Ge _{0.25})	70
Co ₂ FeGa _{0.5} Ge _{0.5}	68
Co ₂ (Cr _{0.02} Fe _{0.98})Ga	67
Co ₂ MnGeSn	67
Co ₂ (Mn _{0.95} Fe _{0.05})Sn	65
(CoFe) ₂ MnGe	65
Co ₂ (Mn _{0.5} Fe _{0.5})Ga	65
Co ₂ (Cr _{0.02} Fe _{0.98})Si	65
Co ₂ MnTiSn	64
Co ₂ MnAl _{0.5} Sn _{0.5}	63
Co ₂ MnGa _x Si _{1-x}	63
Co ₂ FeAlGa	63
Co ₂ MnSiGe	63
Co ₂ (Mn _{0.5} Fe _{0.5})Si	61
Co ₂ Mn(Al _{0.5} Si _{0.5})	60
Co ₂ FeGa _{0.5} Si _{0.5}	60
Co ₂ Fe(Al _{0.5} Si _{0.5})	60

PCAR (点接触アンドレエフ反射) 法とは？



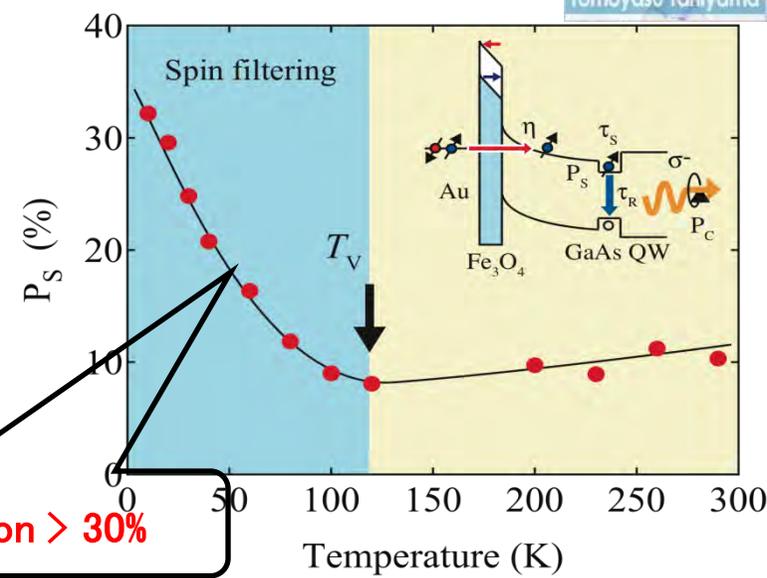
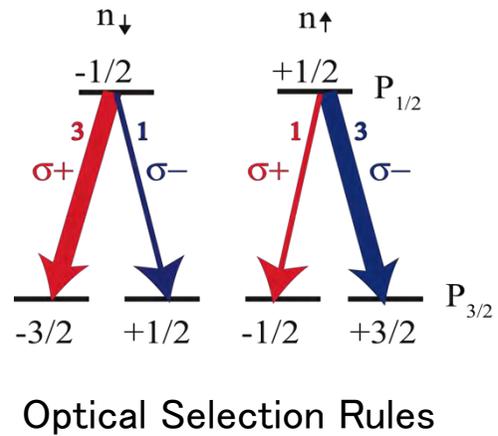
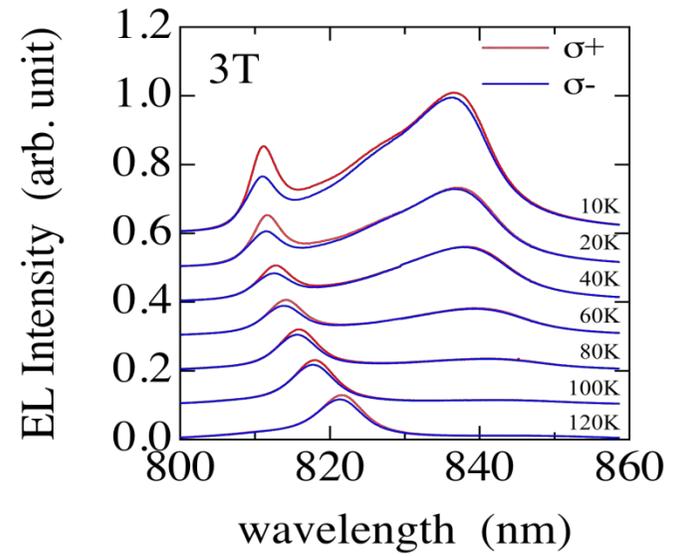
最大のP値はCo₂MnGe_{0.75}Ga_{0.25}で達成





Tomoyasu Taniyama

チューナブルスピソース Fe₃O₄ からGaAs量子井戸へのスピ注入



Large spin polarization > 30%

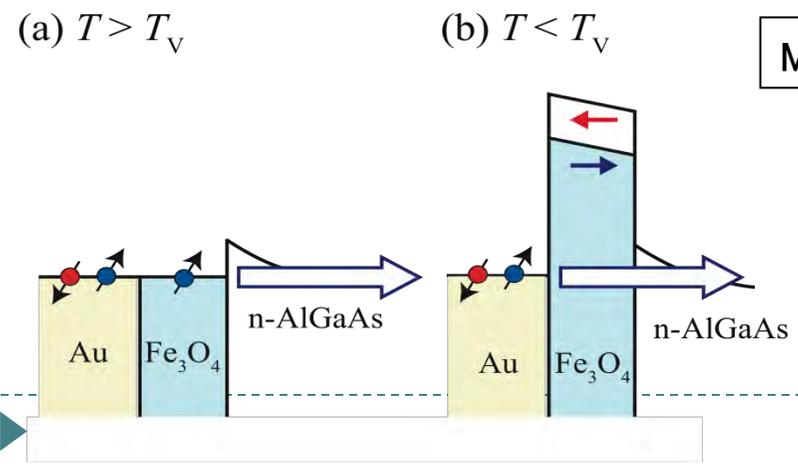
E. Wada, T. Taniyama et al., submitted.

■ Origin of the large spin polarization

Metal-Insulator transition at $T_v=120$ K (Verway transition)

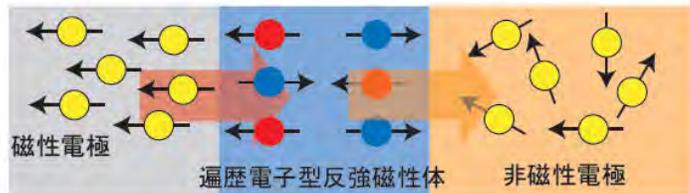
Switching of spin injection mechanism at T_v

Magnetic insulator barrier is effective for efficient spin injection

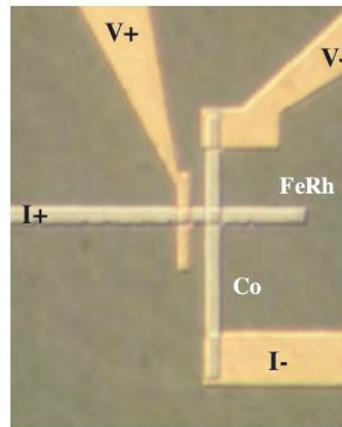
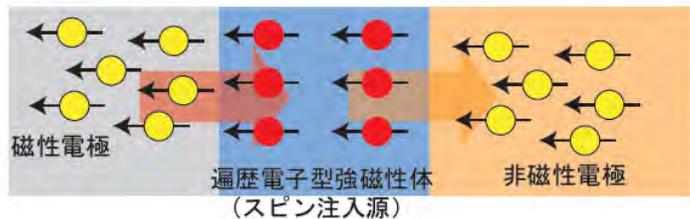


FeRhにおけるスピン注入反強磁性/強磁性転移

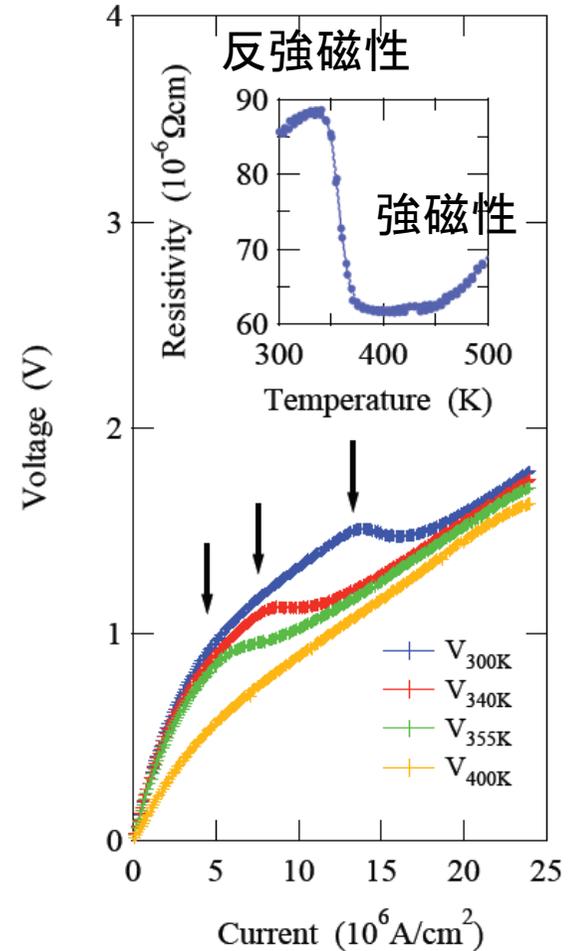
- ▶ 谷山は、FeRhにおいてスピン注入によるスピントランスファートルクによって反強磁性相から強磁性相に相転移を起こすことを見いだしました。



スピン注入反強磁性/強磁性転移



Co/FeRhスピン注入構造



スピン流のまとめ

- ▶ スピン流には、電荷の移動をともなう電流スピン流と、電荷の移動をともなわない純粋スピン流がある。
- ▶ 純粋スピン流は、情報の伝達にジュール熱の発生をともなわないという利点がある。現在までのところスピン拡散長が実用を制限している。グラフェンはスピン拡散長が長いので有望。
- ▶ スピン軌道相互作用の大きな物質では、逆スピンホール効果を使ってスピン流を電流、電圧に変換することができる。
- ▶ 温度差があると熱スピン流が生じ、これを電流に変換できる。これをスピンゼーベック効果という。この効果は、今後エネルギーハーベスティングに利用できる。
- ▶ シリコンにスピン流を注入できるようになったので、既存のCMOS技術との融合が期待できる。

