

# 絶縁体中のスピン流を用いた 超低電力量子情報伝送・演算機能デバイスの研究開発



安藤和也  
東北大学金属材料研究所

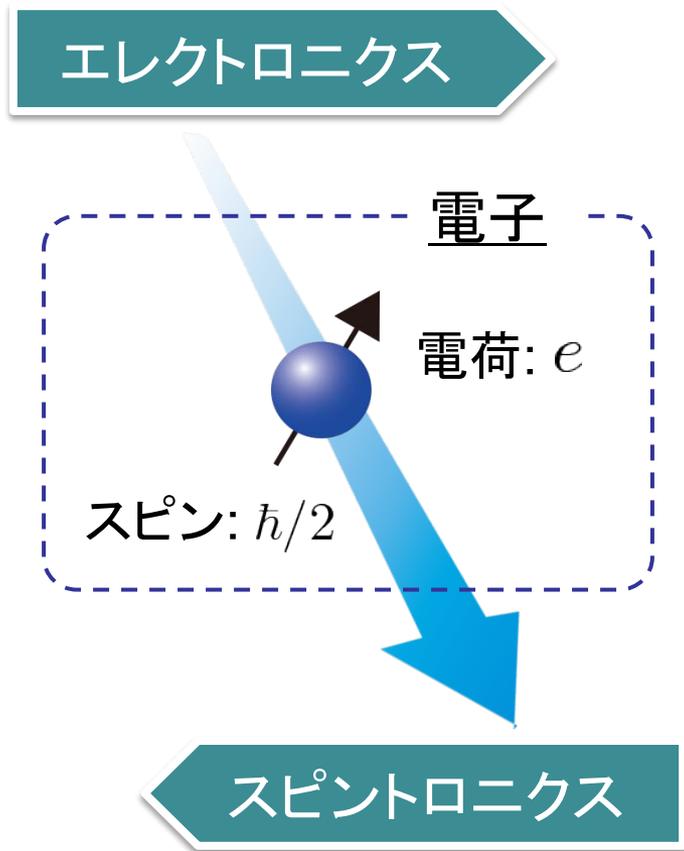
総務省戦略的情報通信研究開発推進制度(SCOPE)

若手ICT研究者育成型研究開発

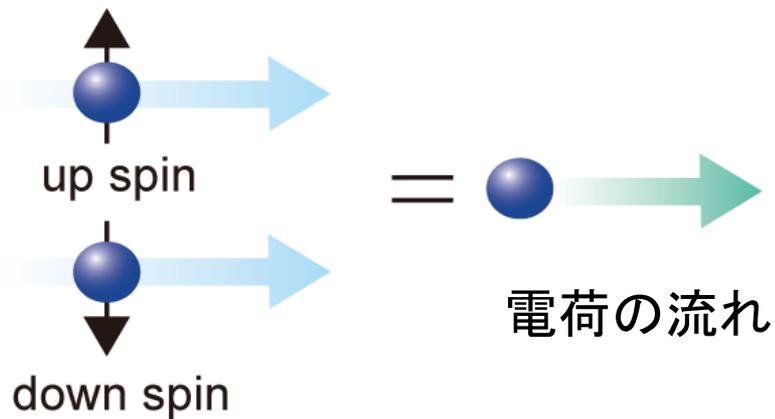
1. 研究背景と研究開発のターゲット  
-スピントロニクスとスピン流-
2. 研究期間内(平成22年度)の主要研究成果
  1. あらゆる物質へ応用可能なスピン注入手法の確立
  2. 非線形スピン流生成現象の発見
3. まとめ

1. **研究背景と研究開発のターゲット**  
-スピントロニクスとスピン流-
2. 研究期間内(平成22年度)の主要研究成果
  1. あらゆる物質へ応用可能なスピン注入手法の確立
  2. 非線形スピン流生成現象の発見
3. まとめ

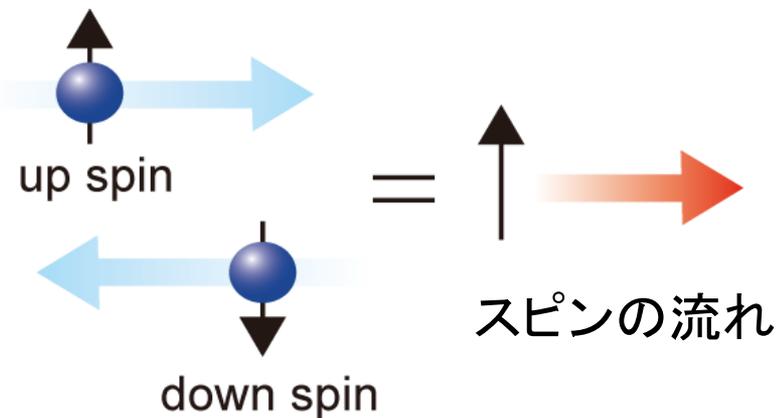
# 電流とスピンの流れ



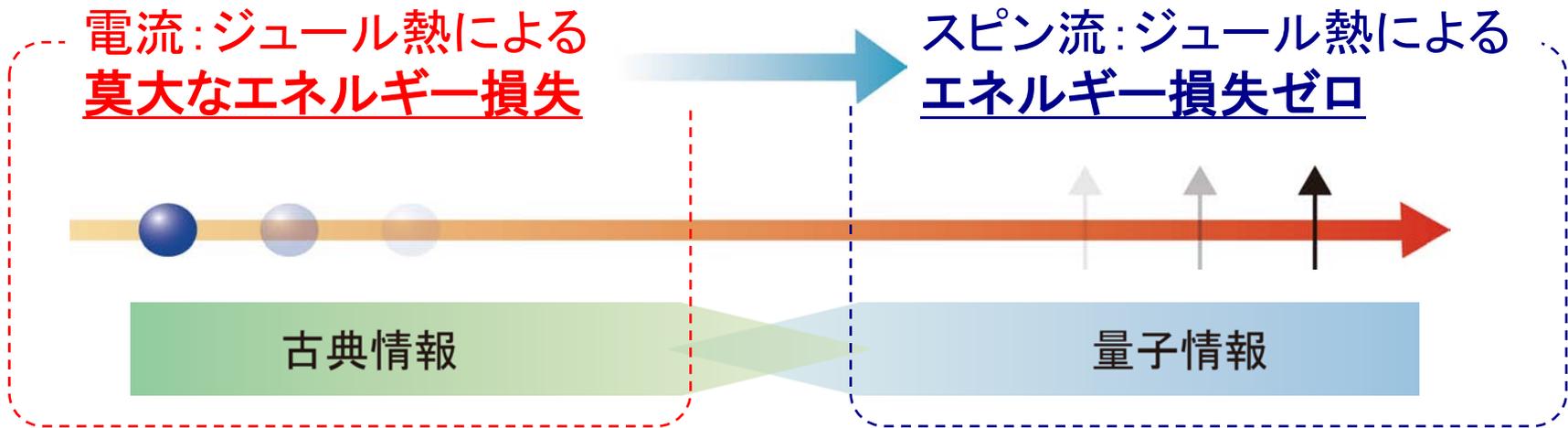
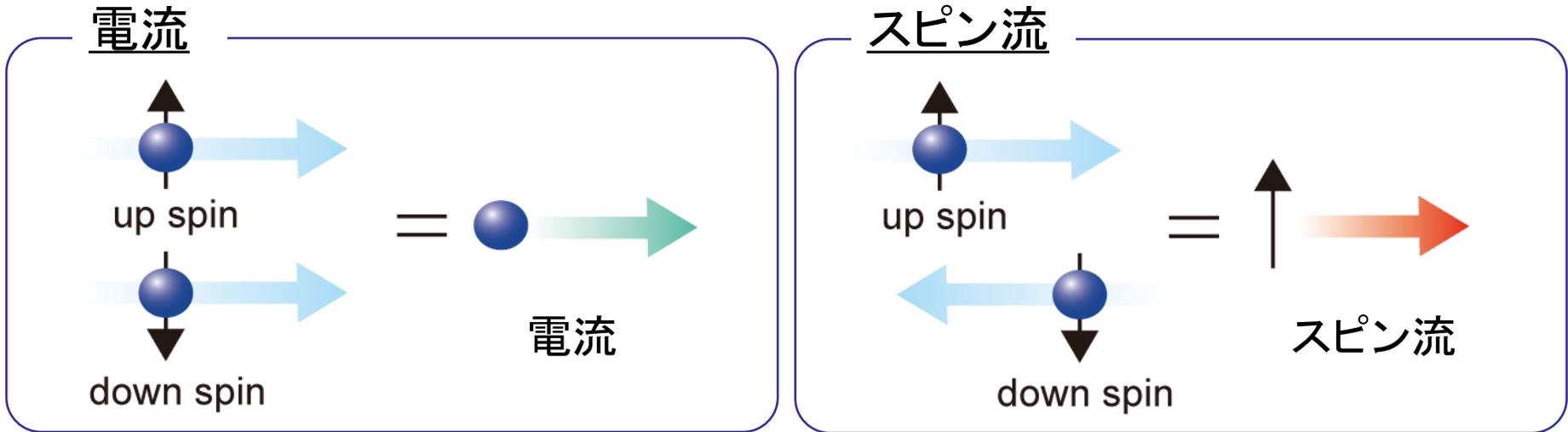
## 電流



## スピン流



# スピン流: スピン角運動量の流れ

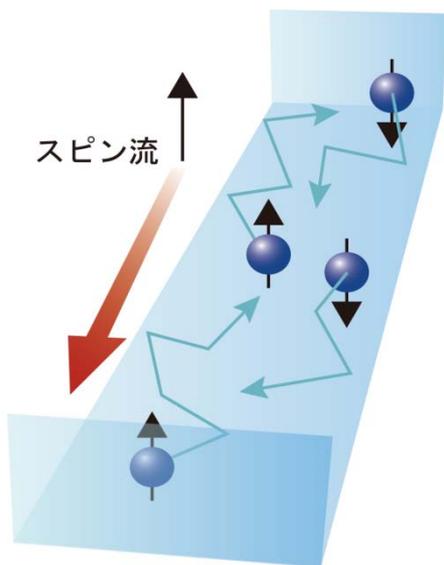


# 絶縁体中のスピン流伝導

## 絶縁体中でもスピン流は流れる

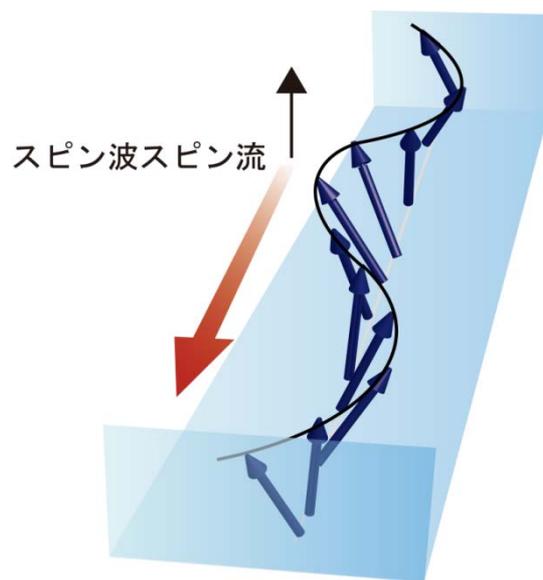
磁性絶縁体：電流にとっては絶縁体、スピン流にとっては伝導体

### 伝導電子型スピン流(金属・半導体)



- 数百nm程度で消失
- 外場による制御が困難

### スピン波スピン流(絶縁体)

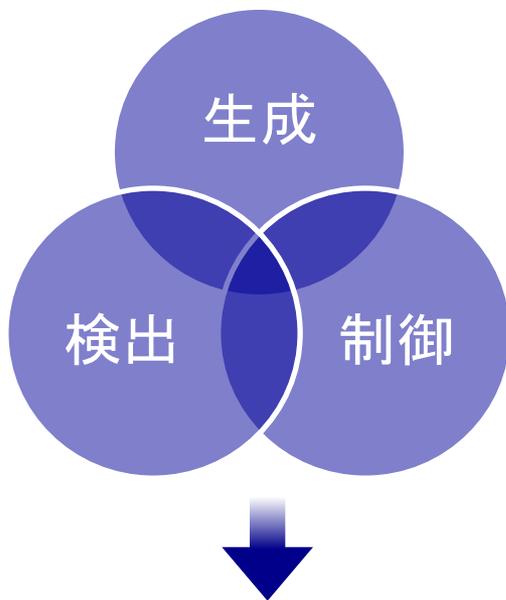


- 極めて長い伝送長(~cm)
- 外場と強く結合

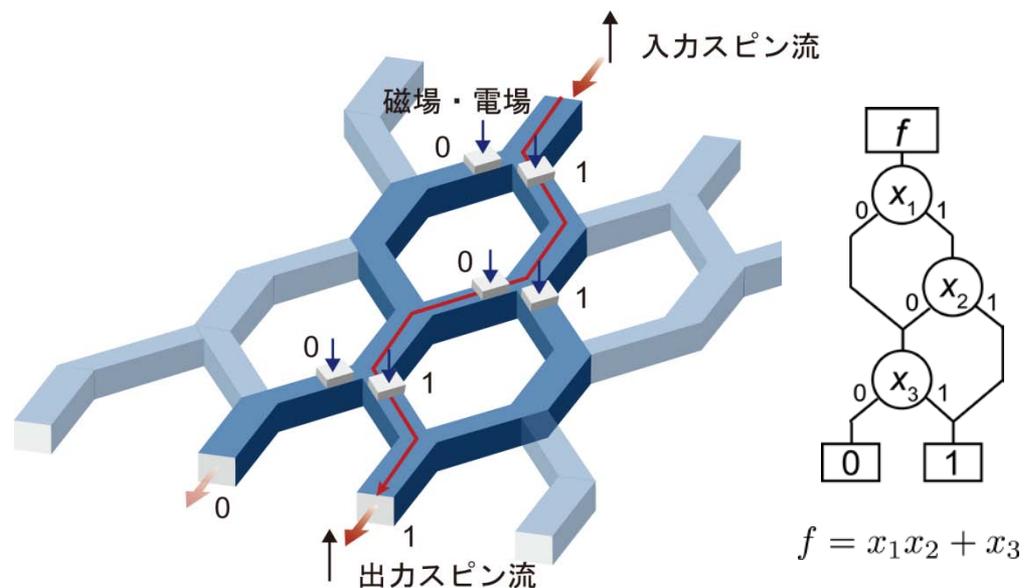
# スピン流デバイスの創出

研究のターゲット:

スピン流を用いたジュール損失ゼロの超低電力電子デバイス原理開拓



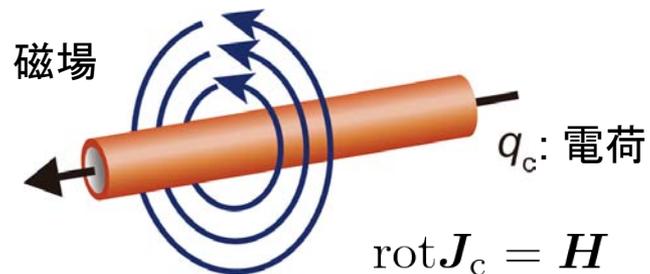
スピン流電子情報デバイス



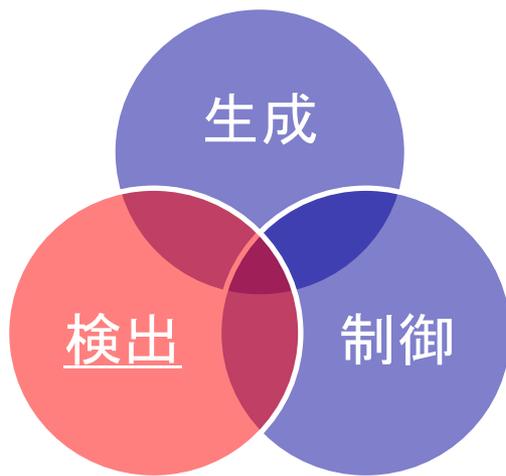
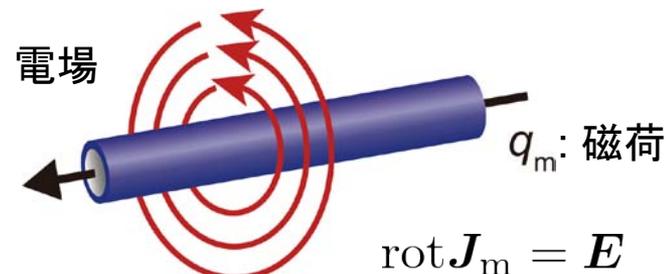
e.g. スピン流論理演算素子

# スピン流の検出: 逆スピホール効果

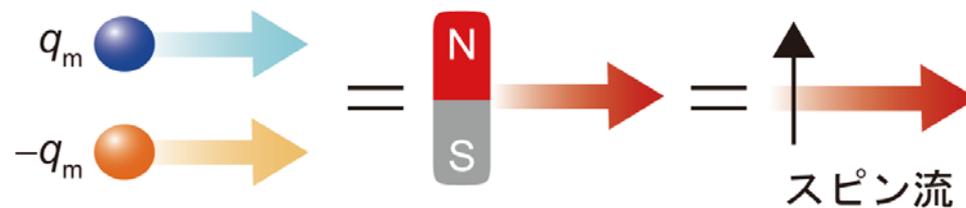
アンペールの法則(電荷)



アンペールの法則(磁荷)

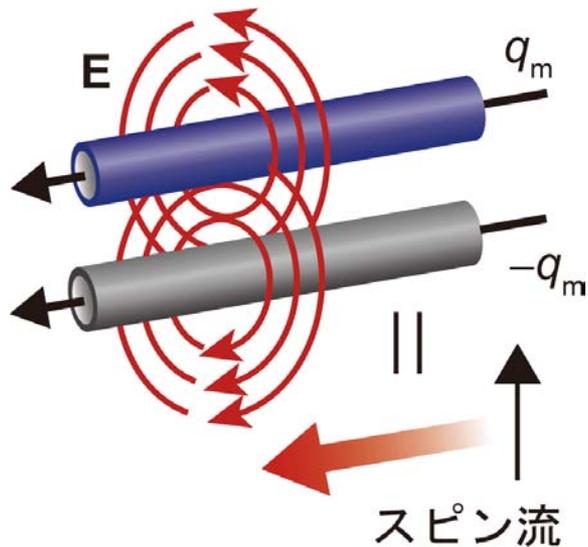


スピン流



スピン流は+と-の2つの磁荷の流れ

# 逆スピホール効果によるスピ流物理の開拓



スピ流 → 電場: 逆スピホール効果



スピ流の電氣的検出が可能

*Phys. Rev. Lett.* **101**, 036601 (2008).  
*Appl. Phys. Lett.* **94**, 262505 (2009).  
*Appl. Phys. Lett.* **96**, 082502 (2010).

*Nature* **464**, 262 (2010).  
*Nature* **455**, 778 (2008).  
*Appl. Phys. Lett.* **94**, 152509 (2009).

本研究の成果:

1. あらゆる物質へ応用可能なスピ注入手法の確立
2. 非線形スピ流生成現象の発見

[1] K. Ando et al., *Nature Materials* **10**, 655 (2011).

[2] K. Ando et al., *Applied Physics Letters* **99**, 092510 (2011).

1. 研究背景と研究開発のターゲット  
–スピントロニクスとスピン流–
2. 研究期間内(平成22年度)の主要研究成果
  1. あらゆる物質へ応用可能なスピン注入手法の確立
  2. 非線形スピン流生成現象の発見
3. まとめ

# スピン流注入とインピーダンスミスマッチ問題

スピン偏極率:  $\alpha = (j_{\uparrow}^N - j_{\downarrow}^N) / (j_{\uparrow}^N + j_{\downarrow}^N) = (j_{\uparrow}^F - j_{\downarrow}^F) / (j_{\uparrow}^F + j_{\downarrow}^F)$

$$\alpha = P \frac{1}{1 + (1 - P^2) \frac{\sigma_F \lambda_N}{\sigma_N \lambda_F}}$$

$P = (\sigma_{\uparrow}^F - \sigma_{\downarrow}^F) / (\sigma_{\uparrow}^F + \sigma_{\downarrow}^F)$ : 強磁性層スピン偏極率

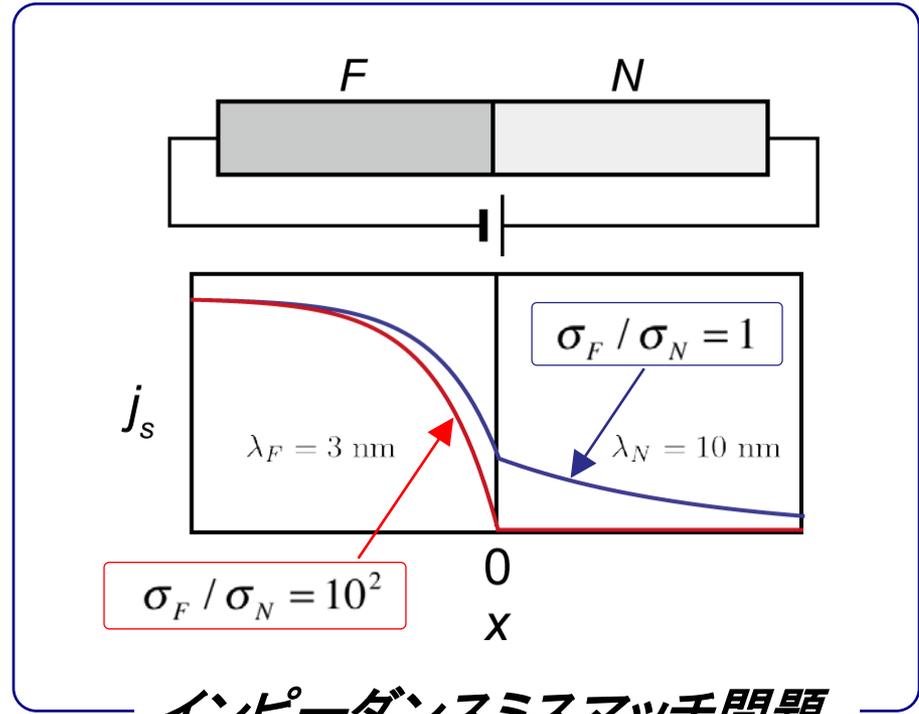
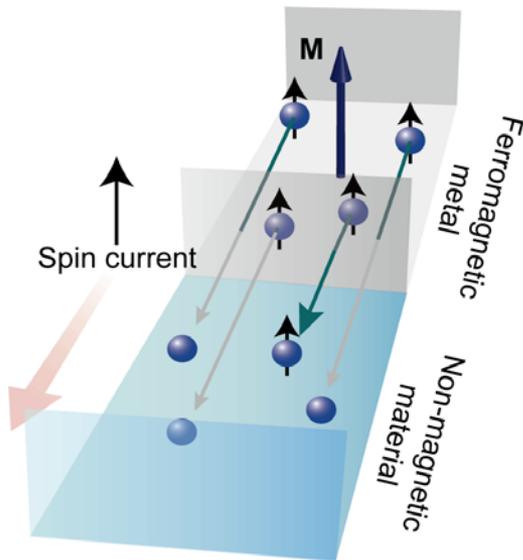
$\sigma_{F(N)}$ : 強磁性層(常磁性層)電気伝導度

金属

$$\sigma_F \sim \sigma_N$$

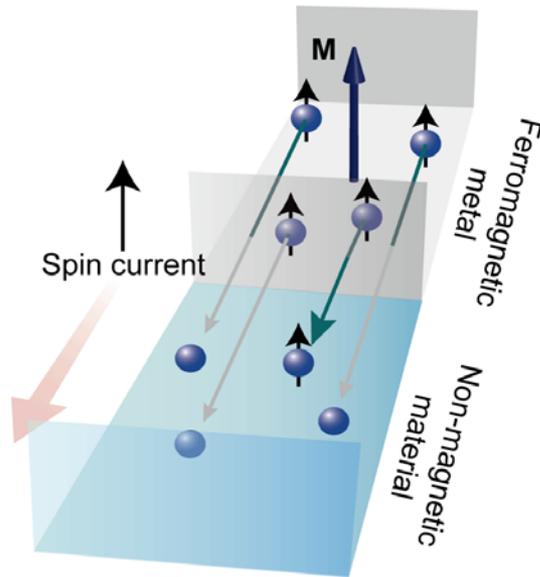
半導体・有機物

$$\sigma_F \gg \sigma_N$$



## インピーダンスミスマッチ問題

# 高抵抗物質へのスピン流注入



電氣的スピン流注入



**高抵抗界面が不可欠**

☹️ オーミックコンタクトを介した  
スピン流注入手法なし

H. J. Zhu et al., *Phys. Rev. Lett.* **87**, 016601 (2001).

GaAs                      Interface: Schottky

X. Jiang et al., *Phys. Rev. Lett.* **94**, 056601 (2005).

GaAs                      Interface: MgO

S.A. Crooker et al., *Science* **309**, 2191 (2005).

GaAs                      Interface: Schottky

X. Lou et al., *Nature Phys.* **3**, 197 (2007).

GaAs                      Interface: Schottky

B. T. Jonker et al., *Nature Phys.* **3**, 542(2007).

Si                              Interface: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

S. P. Dash et al., *Nature* **462**, 491 (2009).

Si                              Interface: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

M. Tran et al., *Phys. Rev. Lett.* **102**, 036601 (2009).

GaAs                      Interface: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

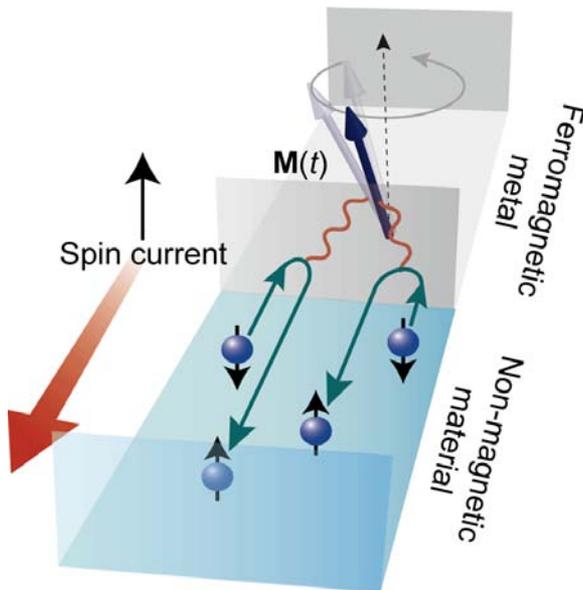
C.H. Li et al., *Nature Commun.* **2**, 245 (2011).

Si                              Interface: SiO<sub>2</sub>

**簡単且つあらゆる物質に応用可能な汎用的スピン流注入手法は？**

# 動的スピンの注入

## 動的スピン流注入

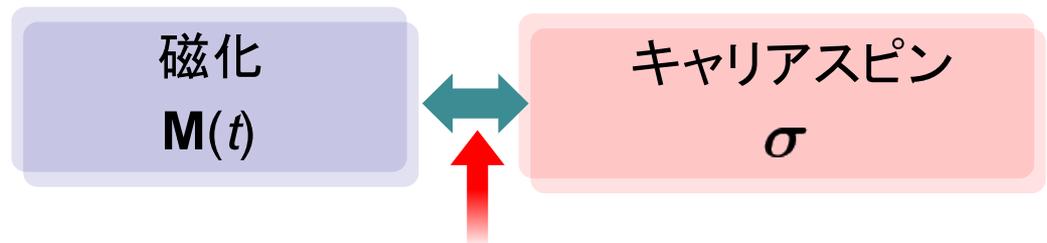


## スピンに対する連続方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} M^i = -\nabla \cdot j_s^i + T^i$$

$$T^i \propto \left( M \times \frac{\partial M}{\partial t} \right)^i$$

磁化ダイナミクス → スピン流



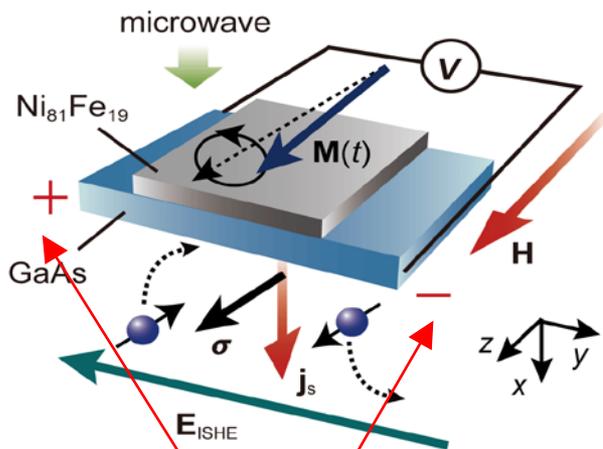
交換相互作用

## スピンプンピング

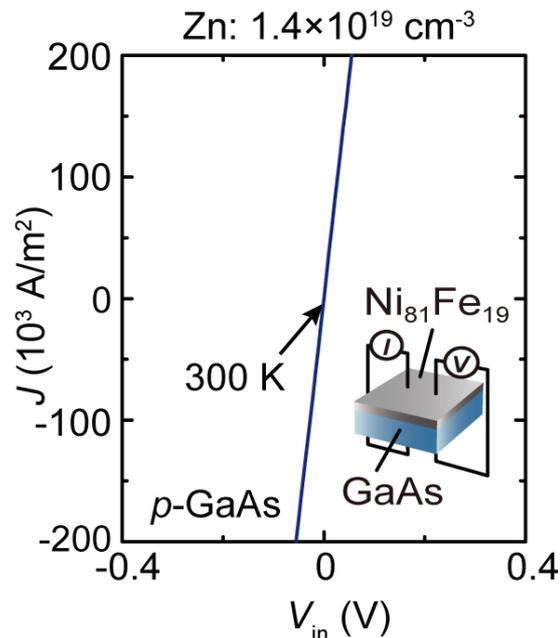
$$j_s = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \frac{\hbar}{4\pi} g_r^{\uparrow\downarrow} \frac{1}{M_s^2} \left[ M(t) \times \frac{dM(t)}{dt} \right]_z dt$$

# スピンプンピングと逆スピンホール効果

## スピンプンピング + 逆スピンホール効果



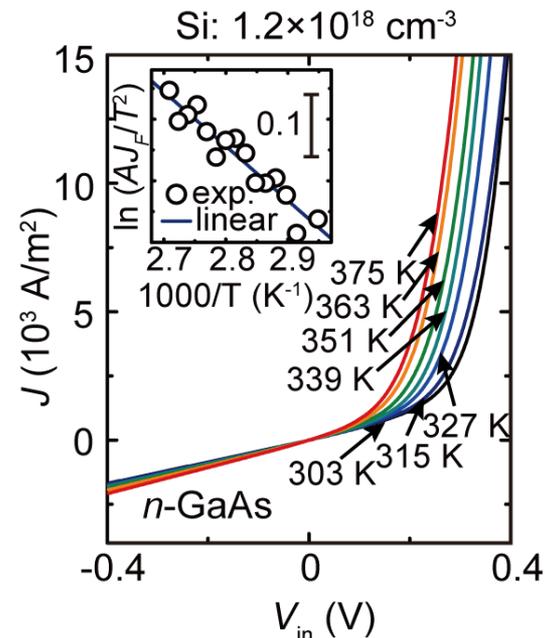
逆スピンホール効果  
による起電力



$\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/p\text{-GaAs}$

オーミック界面

$$\sigma_N/\sigma_F = 9.7 \times 10^{-3}$$



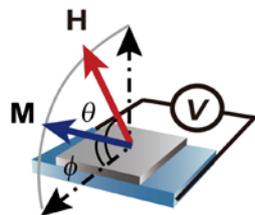
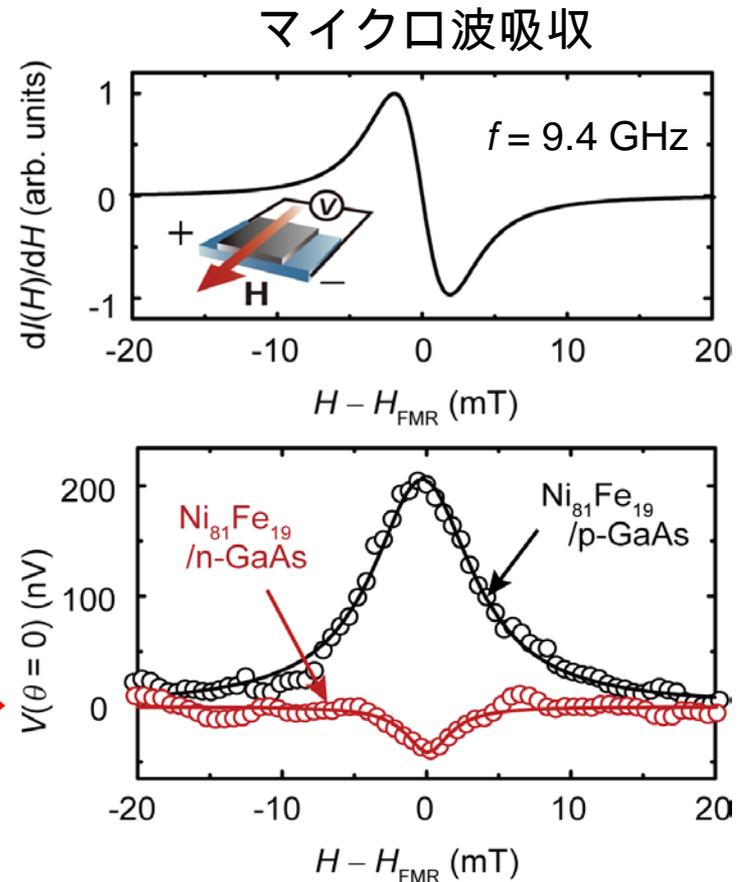
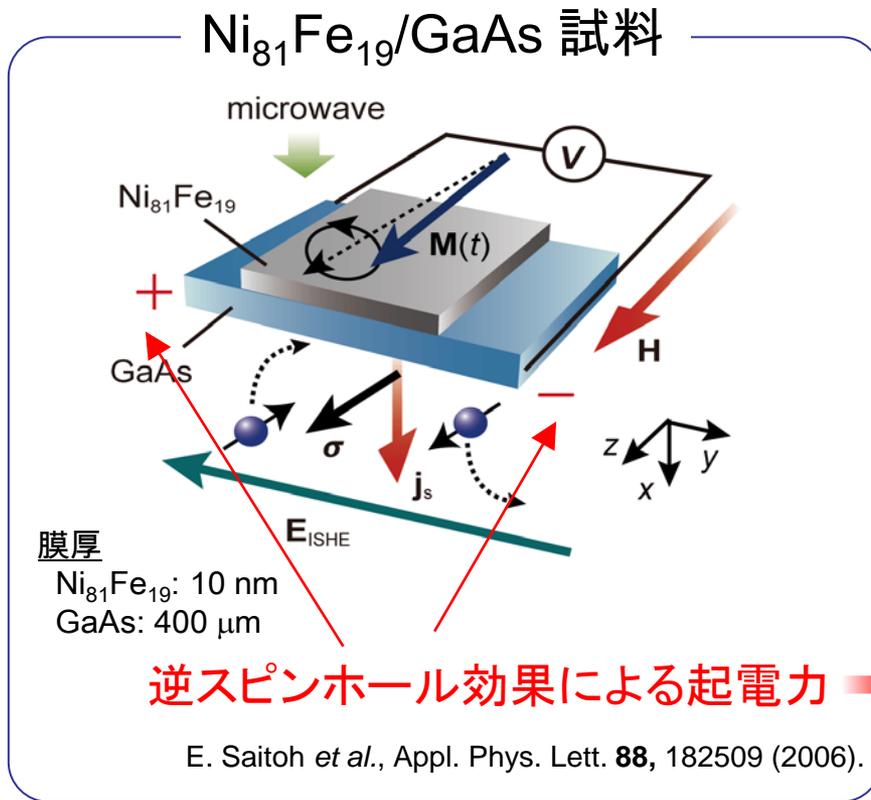
$\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/n\text{-GaAs}$

ショットキー界面

$$\sigma_N/\sigma_F = 2.6 \times 10^{-2}$$

インピーダンスミスマッチ問題

# スピンプンピングによる高抵抗物質へのスピン流注入

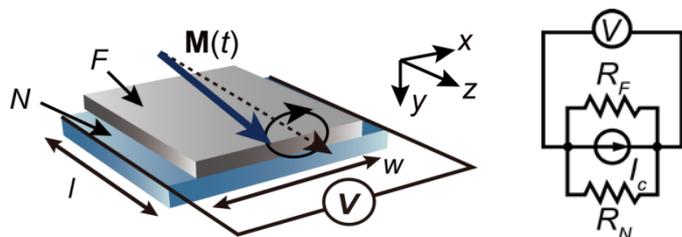


$V(\theta) \equiv (V^\theta - V^{\theta+180^\circ})/2$   
enabling elimination of heating effects from  $V$

あらゆる物質へのスピン流注入が可能に

# スピン流密度

## Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub>/GaAs試料の等価回路模型



$$V_{\text{ISHE}} = R_F R_N / (R_F + R_N) I_c = w [\sigma_N + (d_F/d_N) \sigma_F]^{-1} \langle j_c \rangle$$

## スピン流の緩和

$$j_s(y) = \frac{\sinh[(d_N - y)/\lambda_N]}{\sinh(d_N/\lambda_N)} j_s^0$$

$$\text{ISHE: } j_c(y) = \theta_{\text{SHE}} (2e/h) j_s(y)$$

$$\langle j_c \rangle = \theta_{\text{SHE}} \left( \frac{2e}{h} \right) \frac{\lambda_N}{d_N} \tanh \left( \frac{d_N}{2\lambda_N} \right) j_s^c$$

## 逆スピンホール起電力

$$V_{\text{ISHE}} = \frac{w \theta_{\text{SHE}} \lambda_N \tanh(d_N/2\lambda_N)}{d_N \sigma_N + d_F \sigma_F} \left( \frac{2e}{h} \right) j_s^0$$

## スピンポンピング

$$j_s = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \frac{\hbar}{4\pi} g_r^{\uparrow\downarrow} \frac{1}{M_s^2} \left[ \mathbf{M}(t) \times \frac{d\mathbf{M}(t)}{dt} \right]_z dt$$

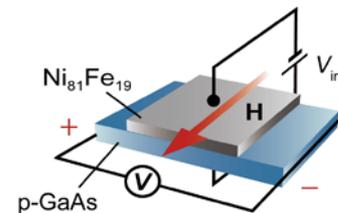
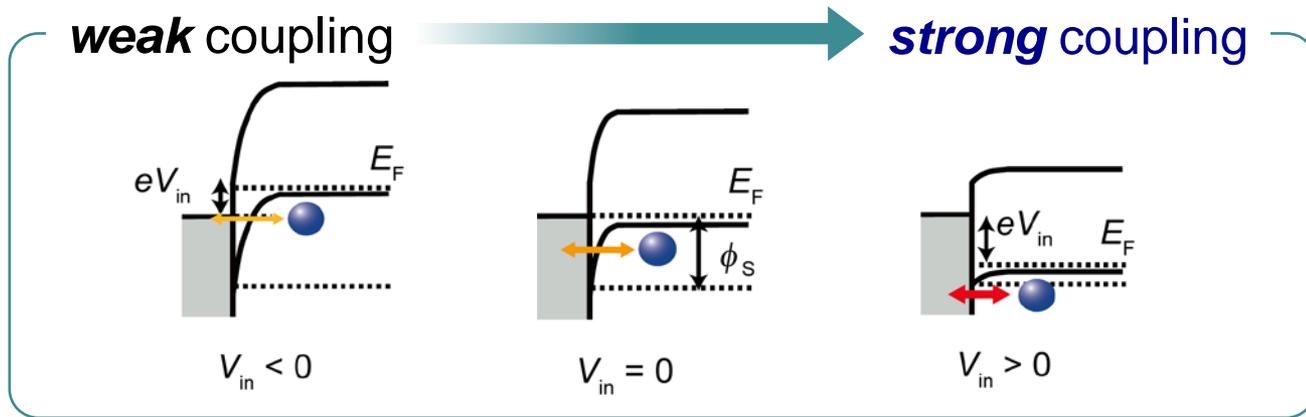
	スピンポンピングコンダクタンス	スピン流密度
Ni <sub>81</sub> Fe <sub>19</sub> /p-GaAs (Ohmic)	$g_r^{\uparrow\downarrow} = 3.7 \times 10^{18} \text{ m}^{-2}$	$j_s^{\text{SP}} = 3.3 \times 10^6 \text{ A/m}^2$
Ni <sub>81</sub> Fe <sub>19</sub> /n-GaAs (Schottky)	$g_r^{\uparrow\downarrow} = 1.5 \times 10^{17} \text{ m}^{-2}$	$j_s^{\text{SP}} = 1.1 \times 10^5 \text{ A/m}^2$

$$\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Pt}^* \quad j_s^{\text{SP}} = 5.8 \times 10^6 \text{ A/m}^2 \quad *K. \text{ Ando et al., J. Appl. Phys. } \mathbf{109}, 103913 (2011).$$

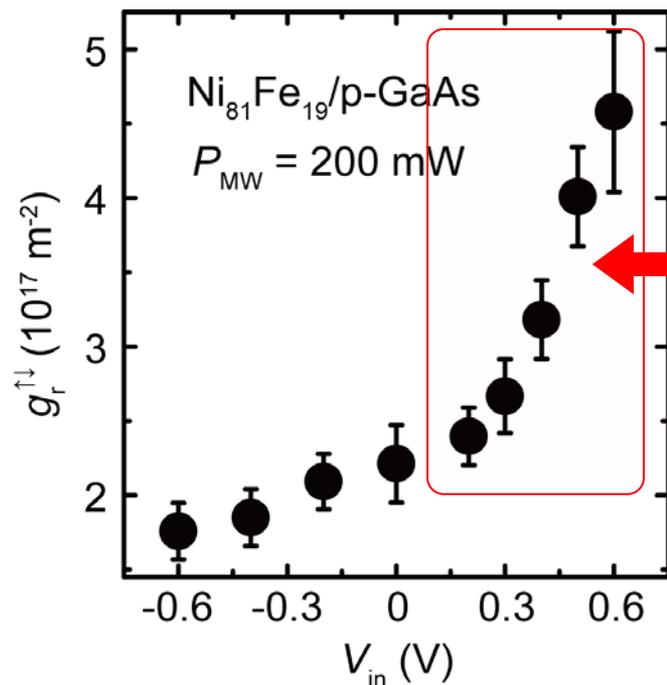
絶縁障壁を介した電气的スピン流注入:  $j_s \sim 10^3 \sim 10^4 \text{ A/m}^2$

従来の $10^2 \sim 10^3$ 倍の巨大なスピン流の注入を実現

# スピンプンピングの電氣的制御



Schottky NiFe/p-GaAs  
( $N_D = 4.1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )



逆スピホール起電力:

$$V_{ISHE} = \frac{w\theta_{SHE}\lambda_N \tanh(d_N/2\lambda_N)}{d_N\sigma_N + d_F\sigma_F} \left(\frac{2e}{\hbar}\right) j_s^0$$

スピンプンピング効率の増大

スピンプンピング:

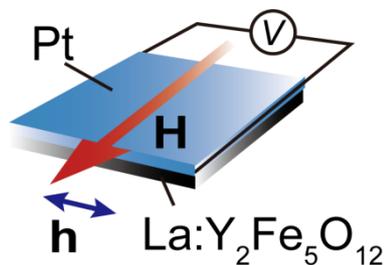
$$j_s = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \frac{\hbar}{4\pi} g_r^{\uparrow\downarrow} \frac{1}{M_s^2} \left[ \mathbf{M}(t) \times \frac{d\mathbf{M}(t)}{dt} \right]_z dt$$

**スピンプンピングの電氣的制御**

K. Ando et al., "Electrically tunable spin injector free from the impedance mismatch problem," *Nature Materials* (2011)

# 金属/絶縁体界面におけるスピンプンピング

Pt(10 nm)/La:Y<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub>(2 μm)

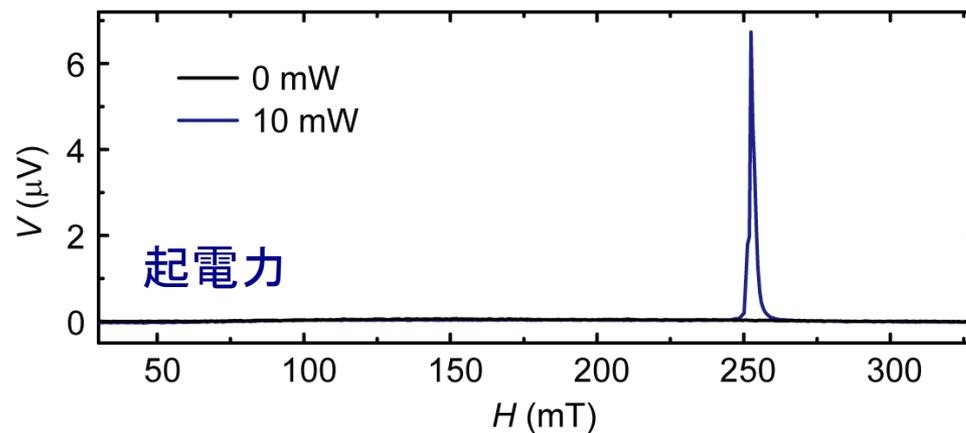
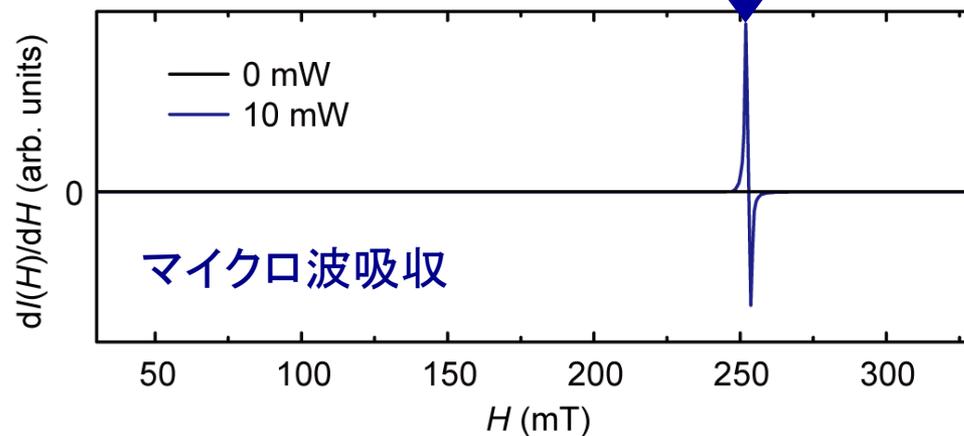


イットリウム鉄ガーネット：  
Y<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub>

極めて小さな磁気緩和:

$$\alpha \sim 10^{-5}$$

強磁性共鳴

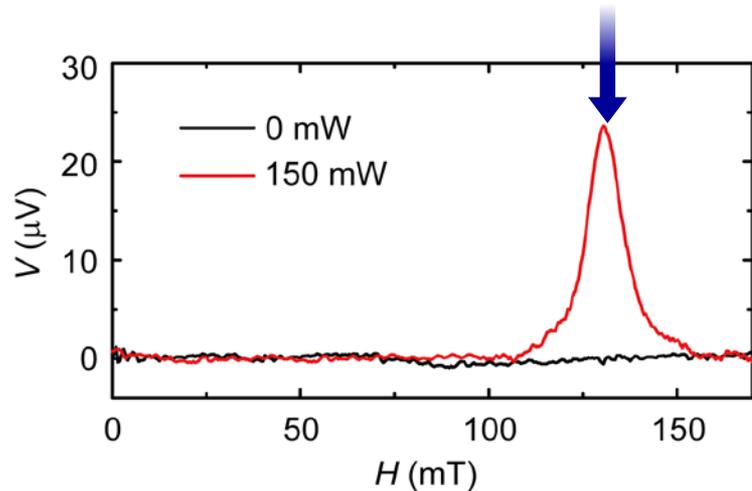


YIG/Pt接合におけるスピンプンピングと逆スピホール効果

# 高マイクロ波強度領域のスピンポンピング

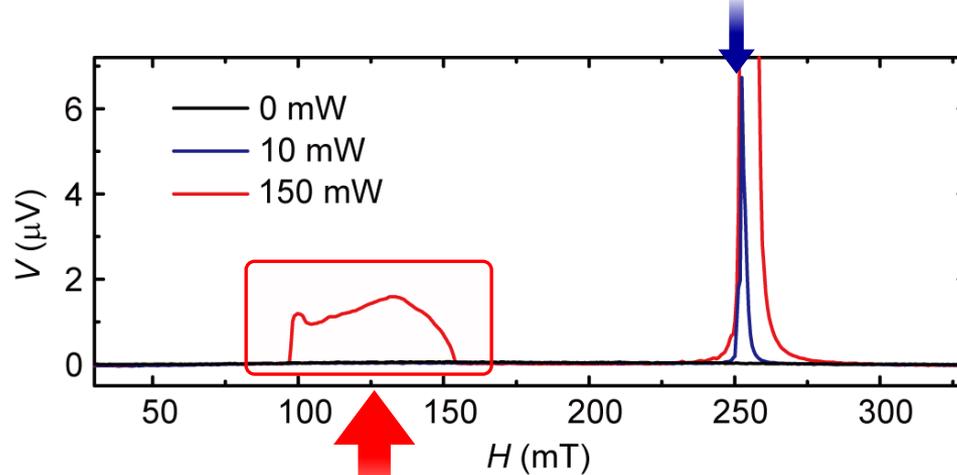
Pt/Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub>

強磁性共鳴



Pt/La:Y<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub>

強磁性共鳴

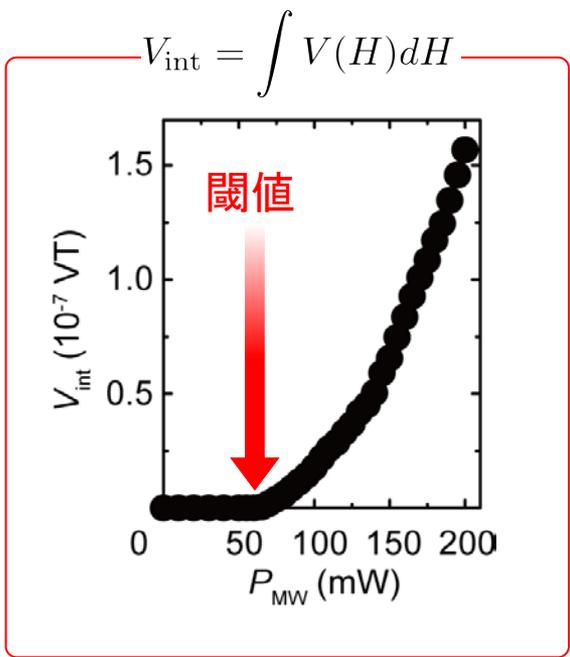
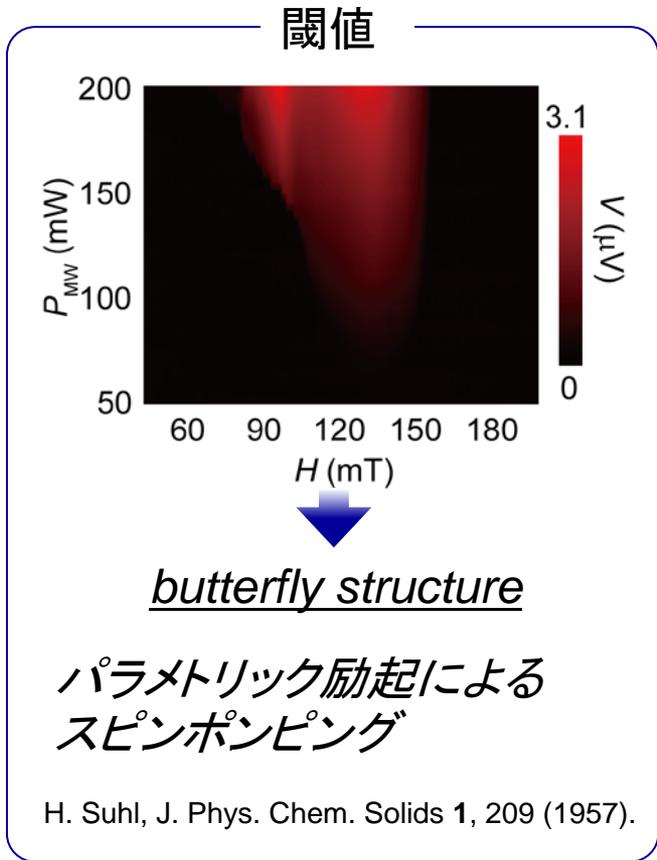
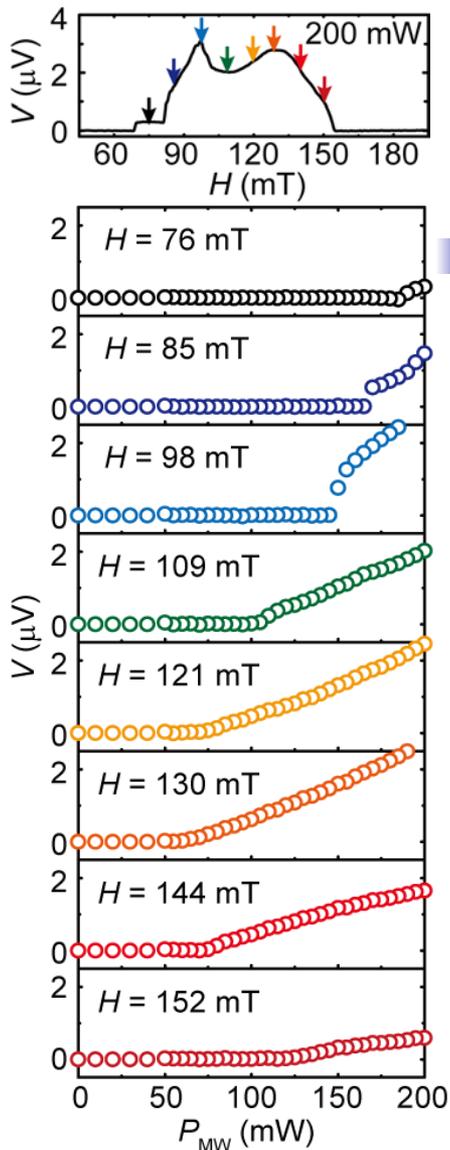


Pt/YIGに特有な新たな信号

Ni <sub>81</sub> Fe <sub>19</sub>	Y <sub>3</sub> Fe <sub>5</sub> O <sub>12</sub>
金属	絶縁体
緩和: <b>大</b> $\alpha \sim 10^{-2}$	緩和: <b>小</b> $\alpha \sim 10^{-5}$

非線形スピンダイナミクスによるスピンポンピング?

# 非線形スピンプンピング



スピンプンピングの非線形生成



スピンプンピング回路中の能動素子構築へのルート

K. Ando et al., "Nonlinear spin pumping induced by parametric excitation," **99**, 092510 (2011).

1. 研究背景と研究開発のターゲット  
-スピントロニクスとスピン流-
2. 研究期間内(平成22年度)の主要研究成果
  1. あらゆる物質へ応用可能なスピン注入手法の確立
  2. 非線形スピン流生成現象の発見
3. まとめ

## 研究開発のターゲット：スピン流電子情報デバイスの基礎原理開拓

1. あらゆる物質へ応用可能なスピン注入手法の確立
2. 非線形スピン流生成現象の発見

### 研究開発期間中の主要業績

#### 【誌上発表リスト】

- [1] K. Ando, S. Takahashi, J. Ieda, H. Kurebayashi, T. Trypiniotis, C. H. W. Barnes, S. Maekawa, and E. Saitoh, "Electrically tunable spin injector free from the impedance mismatch problem," *Nature Materials* **10**, 655 (2011).
- [2] K. Ando, T. An, and E. Saitoh, "Nonlinear spin pumping induced by parametric excitation," *Applied Physics Letters* **99**, 092510 (2011).
- [3] K. Ando, S. Takahashi, J. Ieda, Y. Kajiwara, H. Nakayama, T. Yoshino, K. Harii, Y. Fujikawa, M. Matsuo, S. Maekawa, and E. Saitoh, "Inverse spin-Hall effect induced by spin pumping in metallic system," *Journal of Applied Physics* **109**, 103913 (2011).

#### 【報道発表リスト】

- [1] “スピン流1000倍超注入に成功”、日刊工業新聞17面、2011年6月27日。
- [2] “東北大とJAEA新スピン流注入手法を発見”、化学工業日報、2011年6月27日。
- [3] “電子の磁石「スピン」材料に簡単注入東北大超省エネ基板技術に”、日経産業新聞9面、2011年6月28日。