

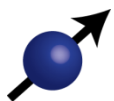
トーキン科学技術賞授賞式 2014年3月4日

# スピンゼーベック効果の発見と 磁性絶縁体の熱電変換応用



東北大学 金属材料研究所  
科学技術振興機構 さきがけ

内田 健一



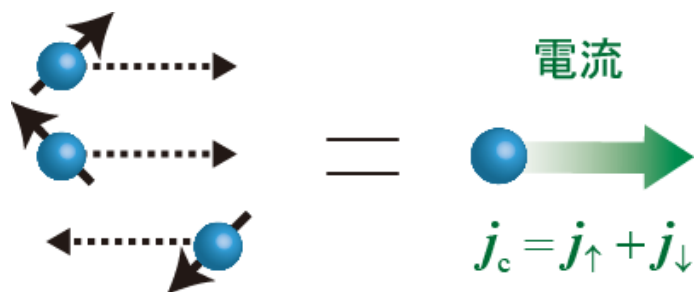
## 本発表の重要なメッセージ

- ・電子スピンの有する量子力学的な性質を利用した、新しいエネルギー変換技術の原理が見えてきている。
- ・磁性体における新しい物理現象「スピンゼーベック効果」を利用すれば、**絶縁体中の熱からも**電流やスピン流を生成できる。

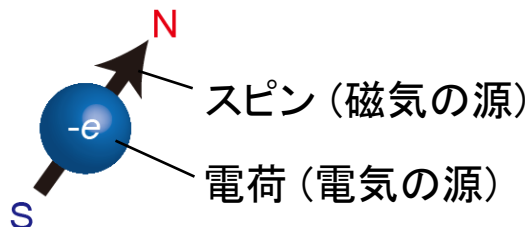
# スピントロニクスとスピン流

## エレクトロニクス

電流で駆動される

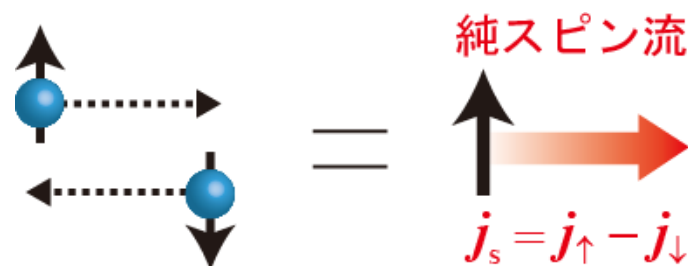


- スピン自由度は利用していない
- ジュール熱によるエネルギーロス (素子の微細化に伴い増加)



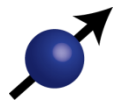
## スピントロニクス

スピン流で駆動される

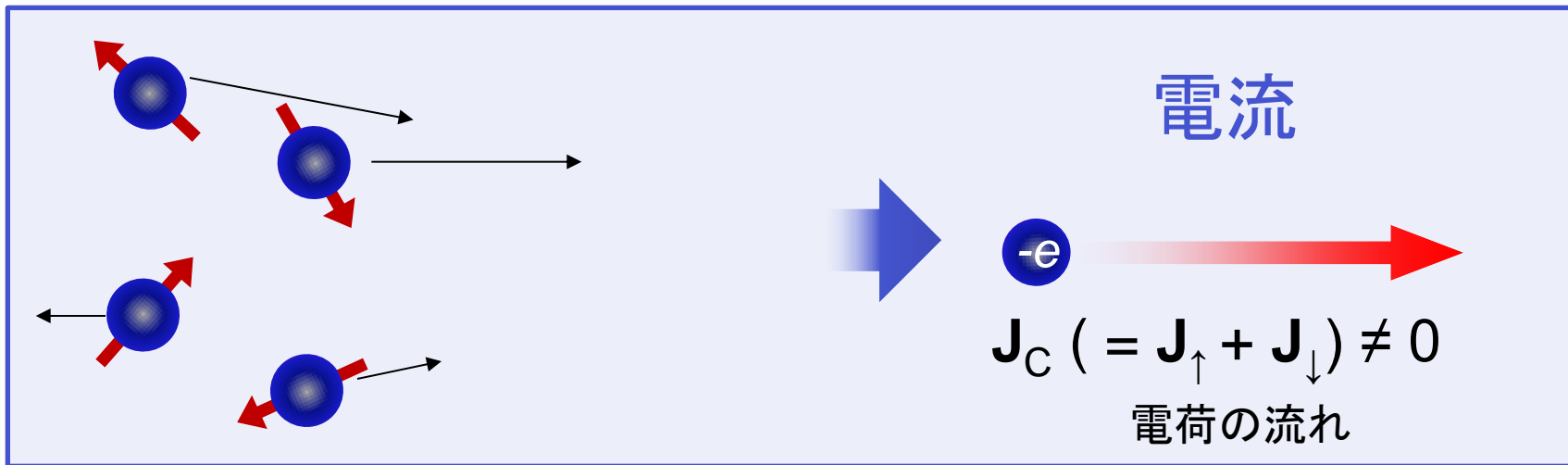


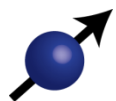
- 磁場を介さない磁化の制御や情報の書き込み・読み出し技術
- 低損失な量子情報伝送などが可能に！

スピントロニクス物性の開拓・確立が必要！

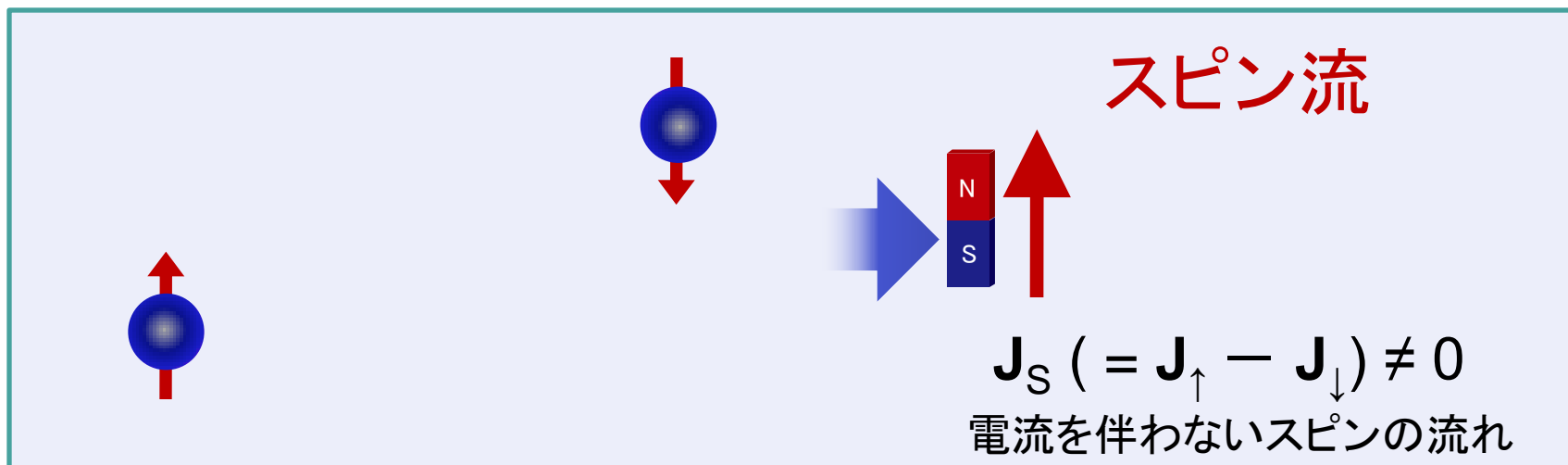
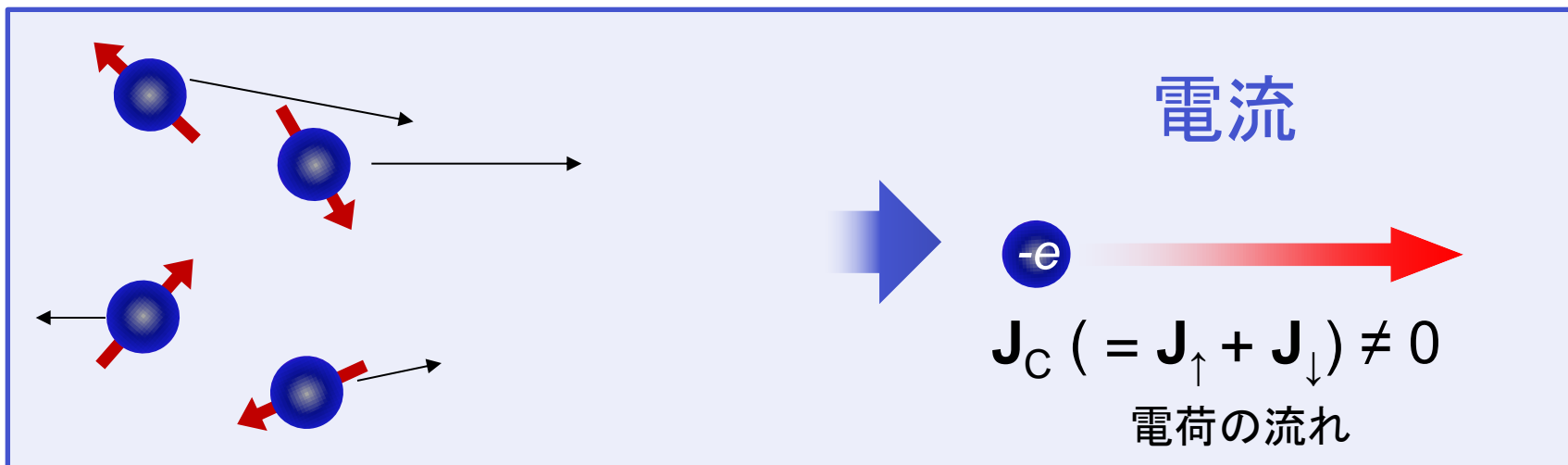


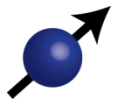
## 伝導電子によって運ばれる電流とスピン流





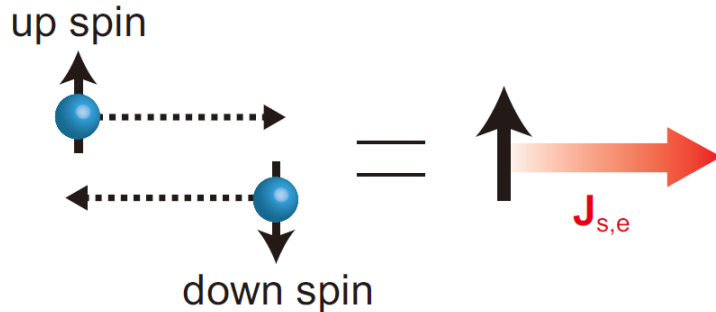
## 伝導電子によって運ばれる電流とスピン流



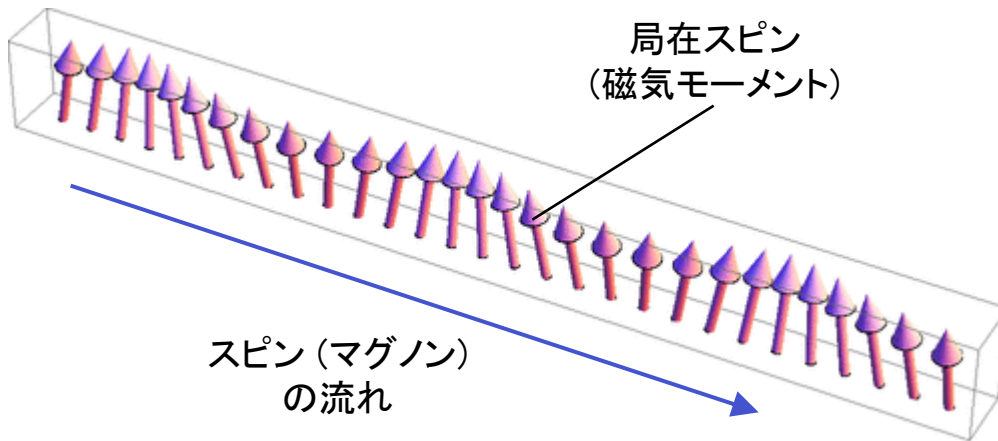


# 伝導電子スピンの流れとスピン波スピンの流れ

## ・伝導電子スピン流 (incoherent mode)

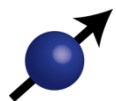


## ・スピン波スピン流 (collective mode)



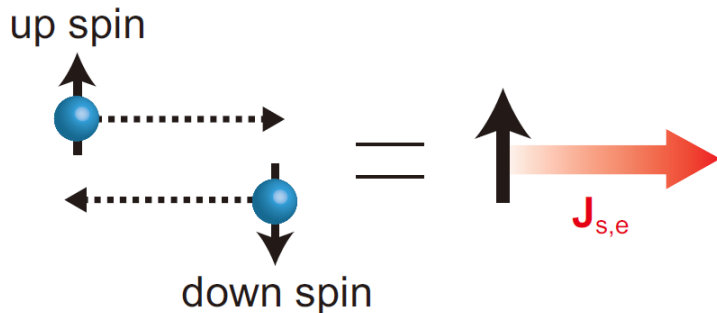
局在スピンの集団運動  
(スピン波 or マグノン)  
がスピン角運動量を輸送

|          |      |
|----------|------|
| 光の量子:    | フォトン |
| 音波の量子:   | フォノン |
| スピン波の量子: | マグノン |

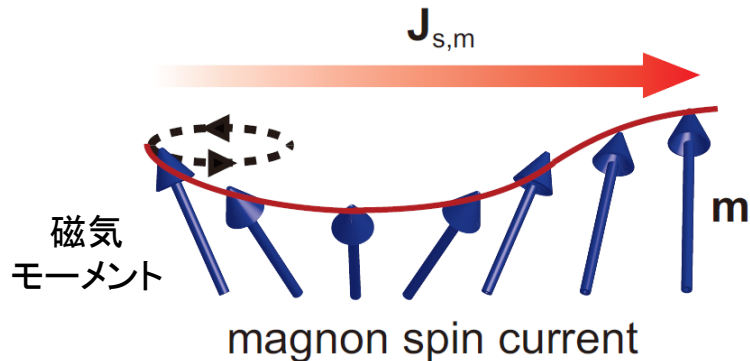


# 伝導電子スピン流とスピン波スピン流

- ・伝導電子スピン流 (incoherent mode)



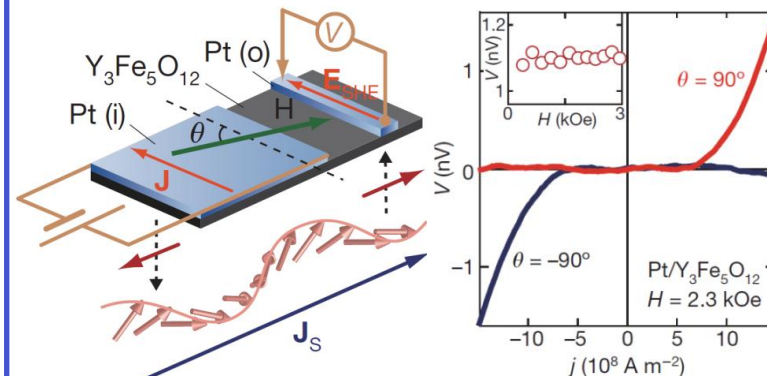
- ・スピン波スピン流 (collective mode)



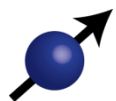
- ・絶縁体中にも存在できる！
- ・長距離伝送可能 (cm in YIG)

(磁気損失以外の) **ジュール熱がない**

## 絶縁体中のスピン波スピン流 を利用した電気信号伝送

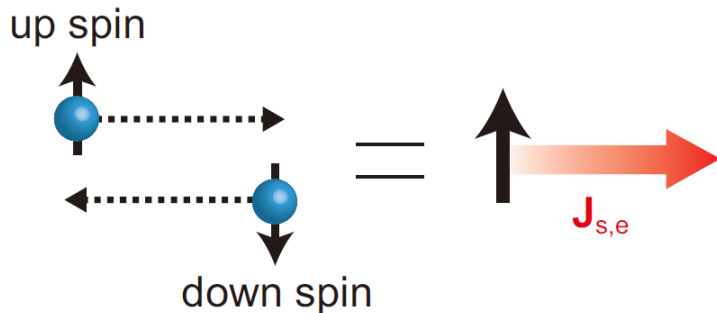


Y. Kajiwara, K. Uchida *et al.*,  
Nature (2010).

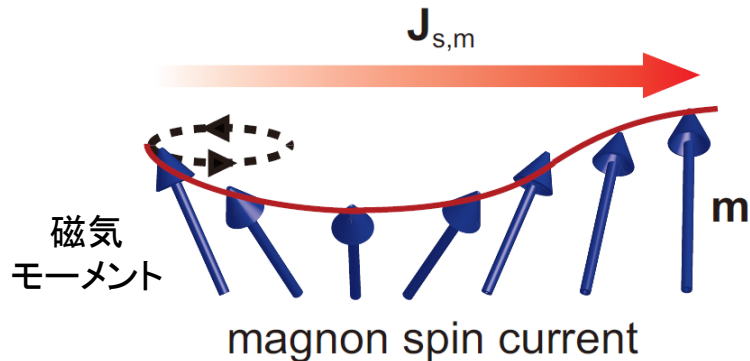


# 伝導電子スピンの流とスピン波スピンの流

## ・伝導電子スピンの流 (incoherent mode)



## ・スピン波スピンの流 (collective mode)



- ・絶縁体中にも存在できる！
- ・長距離伝送可能 (cm in YIG)

(磁気損失以外の) **ジュール熱がない**

|     |      | 電流 | スピンの流 |
|-----|------|----|-------|
| 導体  | 磁性体  | ○  | ○     |
|     | 非磁性体 | ○  | ○     |
| 絶縁体 | 磁性体  | ×  | ○     |
|     | 非磁性体 | ×  | ×     |

本研究の主役！



# 電流とスピンの物理的生成法

|      | 電気・電磁氣的                       | 熱的                | 光学的   |
|------|-------------------------------|-------------------|-------|
| 電流   | 電磁誘導<br>ローレンツ力                | 熱電効果<br>(ゼーベック効果) | 光起電力  |
| スピン流 | スピンプンピング<br>スピンホール効果<br>非局所手法 | ??                | 円偏光励起 |

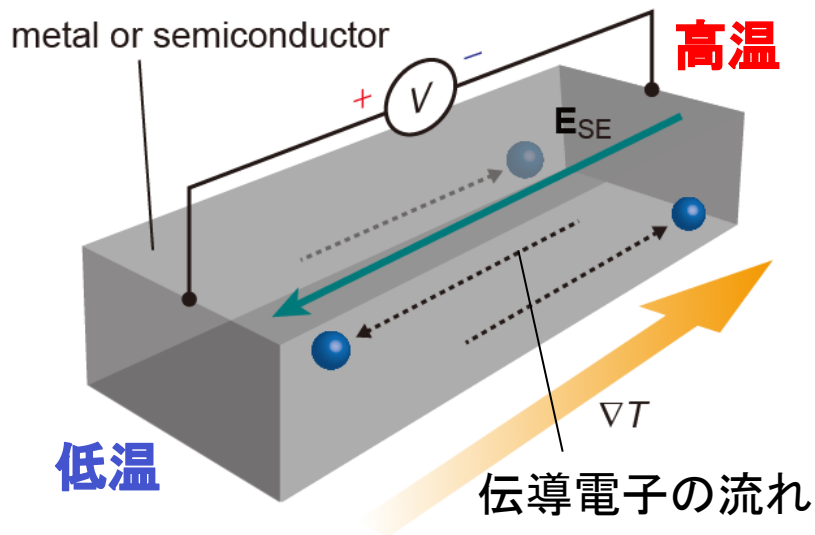
## 電流とスピンの物理的生成法

|      | 電気・電磁氣的                       | 熱的                | 光学的   |
|------|-------------------------------|-------------------|-------|
| 電流   | 電磁誘導<br>ローレンツ力                | 熱電効果<br>(ゼーベック効果) | 光起電力  |
| スピン流 | スピンプンピング<br>スピンホール効果<br>非局所手法 | ??                | 円偏光励起 |

スピンのゼーベック効果

# ゼーベック効果 (熱電効果)

## ゼーベック効果



温度勾配による電流生成

$$V = S\Delta T$$

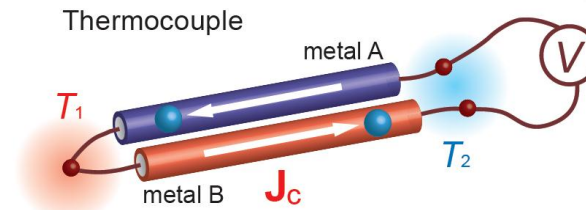
熱流 (温度差) → 電流 (電圧)



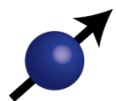
T. J. Seebeck  
(1770-1831, Germany)

ドイツの物理学者、医師。  
1821年にゼーベック効果を  
発見した。

熱電モジュール

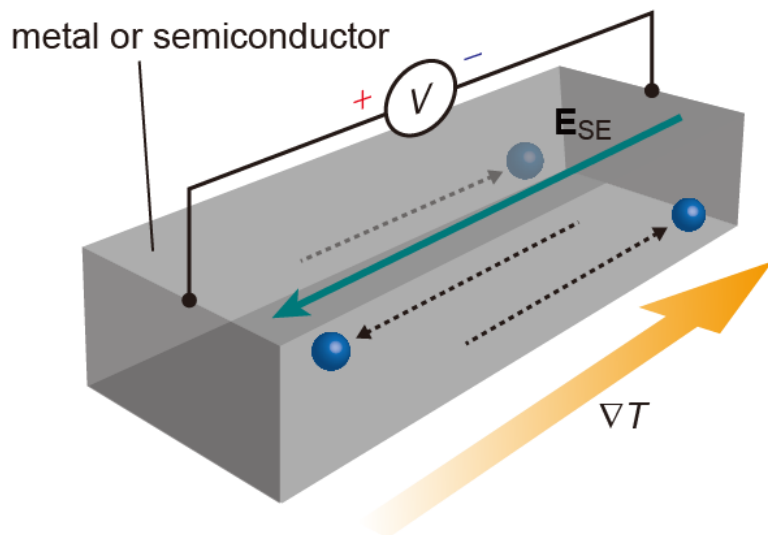


熱電対  
(温度計)



# ゼーベック効果とスピンゼーベック効果

## ゼーベック効果

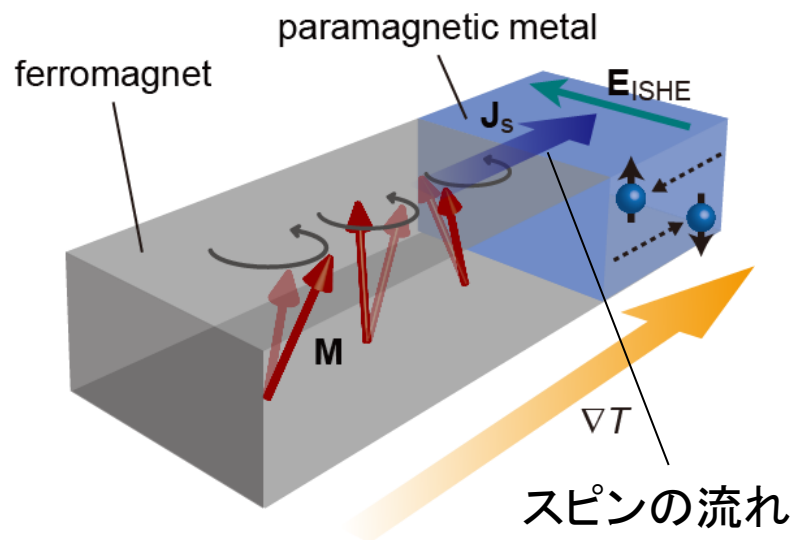


温度勾配による電流生成

$$V = S\Delta T$$

熱流 (温度差)  $\rightarrow$  電流 (電圧)

## スピンゼーベック効果



温度勾配によるスピン流生成

$$V_S = S_S\Delta T$$

熱流 (温度差)  $\rightarrow$  スピン流 (スピン圧)

# スピナーベック効果の発見（慶應義塾大学在籍時の卒論研究）

## スピナーベック効果の世界初の観測に成功！（金属系）

**K. Uchida**, S. Takahashi, K. Harii, J. Ieda, W. Koshibae, K. Ando, S. Maekawa, E. Saitoh  
 “Observation of the spin Seebeck effect”, *Nature* **455**, 778-781 (2008).

被引用数: 314 (2014年2月, Web of Science)

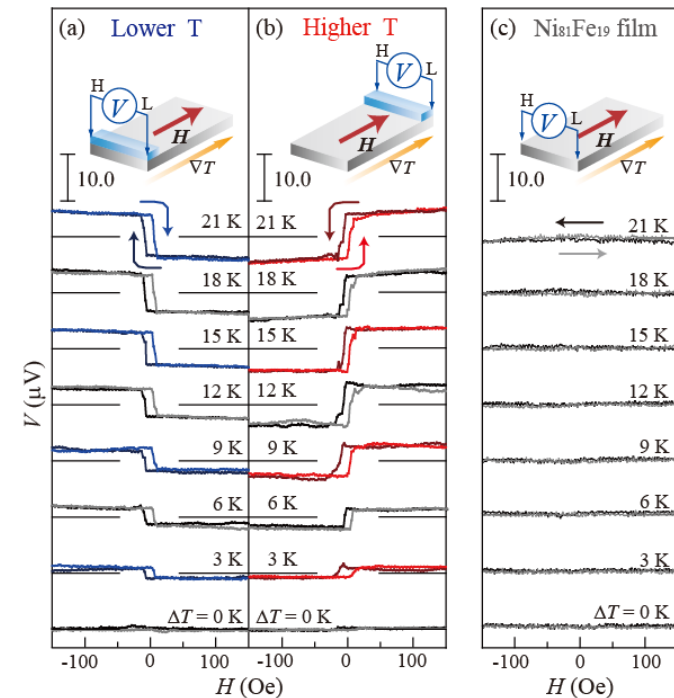


Nature誌に  
論文掲載！



東京新聞 2008/10/11

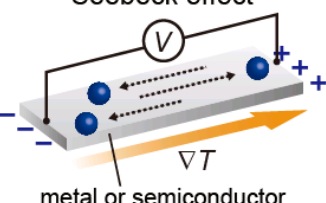
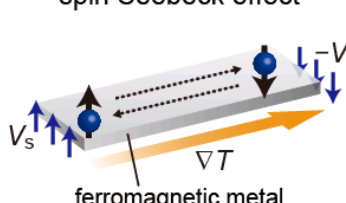

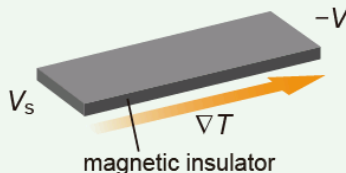
「22歳の頭脳 世界へ  
ネイチャーに慶大生の論文」



# 絶縁体におけるスピンゼーベック効果の発見

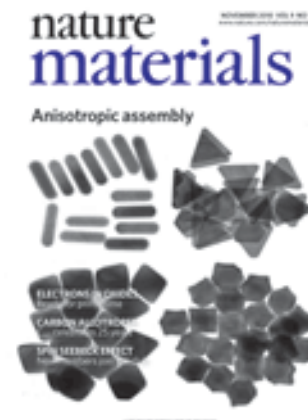
## 磁性絶縁体におけるスピンゼーベック効果の観測に成功！

**K. Uchida**, J. Xiao, H. Adachi, J. Ohe, S. Takahashi, J. Ieda, T. Ota, Y. Kajiwara, H. Umezawa, H. Kawai, G. E. W. Bauer, S. Maekawa, E. Saitoh, "Spin Seebeck insulator", *Nature Materials* **9**, 894-897 (2010).

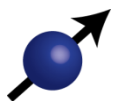
| output    | Electricity   | Magnetism  |
|-----------|---|--|
| Material  |   |  |
| Conductor | Seebeck effect<br><br>metal or semiconductor | spin Seebeck effect<br><br>ferromagnetic metal  |
| Insulator |    | spin Seebeck effect<br><br>magnetic insulator |

Nature Materials  
誌に論文掲載！

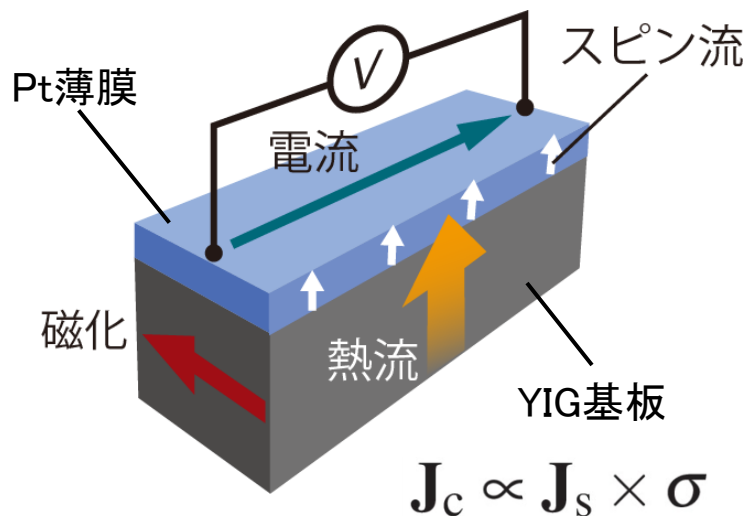
被引用数: 160  
(2014年2月)



Nature Materials誌2010年11月号で  
スピンゼーベック効果が特集された



## 絶縁体中の温度差から電圧を取り出す

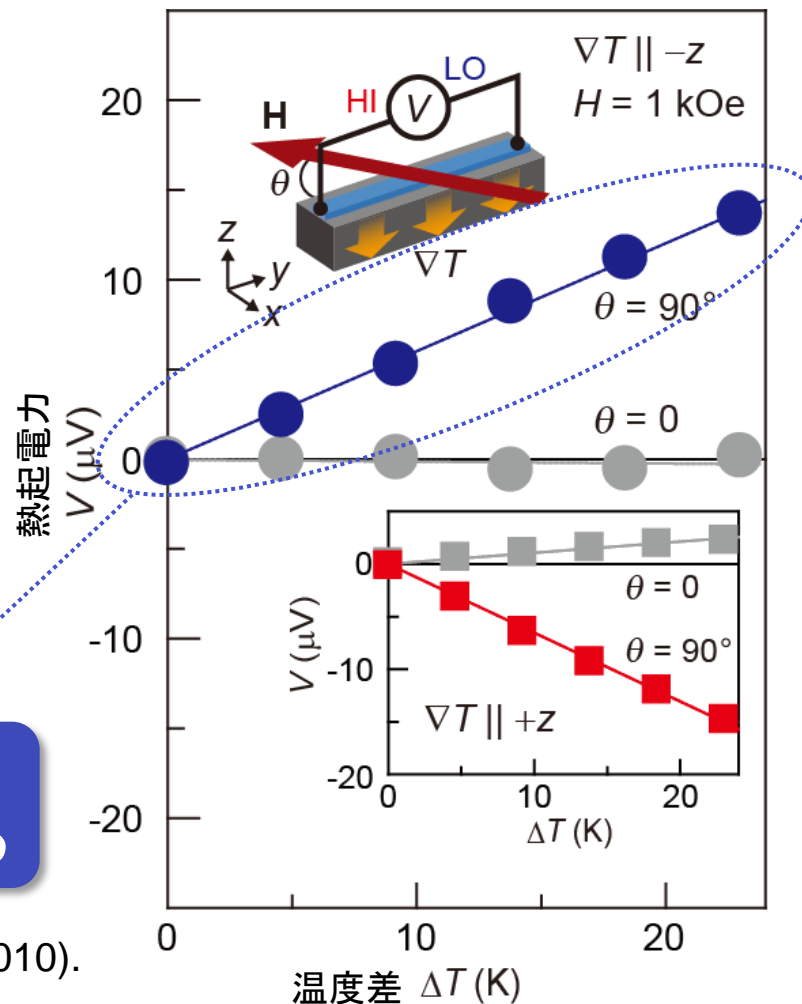


試料サイズ:

YIG基板: 6 mm x 2 mm x 1 mm

Pt薄膜: 6 mm x 0.5 mm x 15 nm

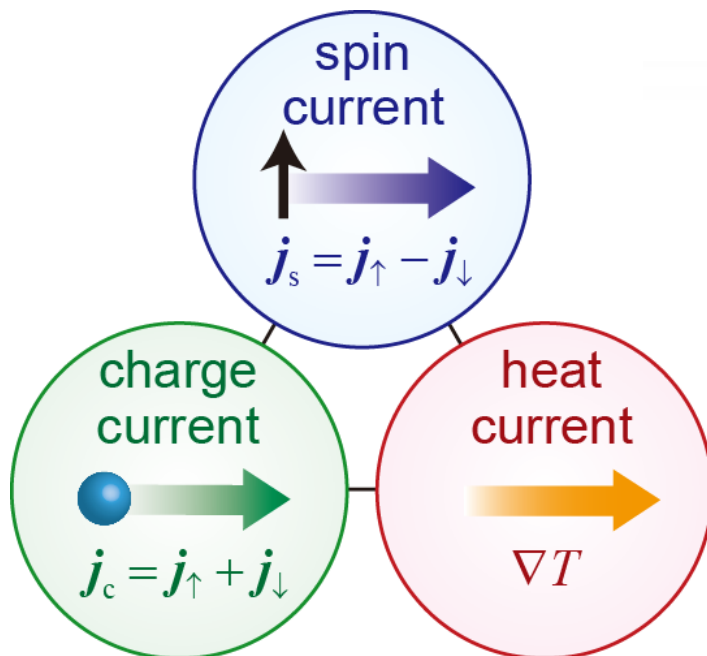
絶縁体に取り付けた金属膜に  
温度差に比例した電圧が生じる



K. Uchida *et al.*, Appl. Phys. Lett. **97**, 172505 (2010).

# スピントロニクス(Spin Caloritronics)分野の誕生

熱流・スピン流・電流  
相互作用物性の開拓



International Workshop on Spin Caloritronics

SPIN CALORITRONICS V

2013

2012

2011

2010

2009

www.lorentzcenter.nl

www.lorentzcenter.nl

G. E. W. Bauer, E. Saitoh, and B. J. van Wees, *Spin Caloritronics*, *Nature Materials* (2012).



# 熱機関からスピンカロリトロニクスへ

## 乱雑な熱運動から一方向の運動を取り出す人工的な仕掛け

ヘロンの蒸気機関  
(古代アレクサンドリア)



ワットの蒸気機関  
(1769)

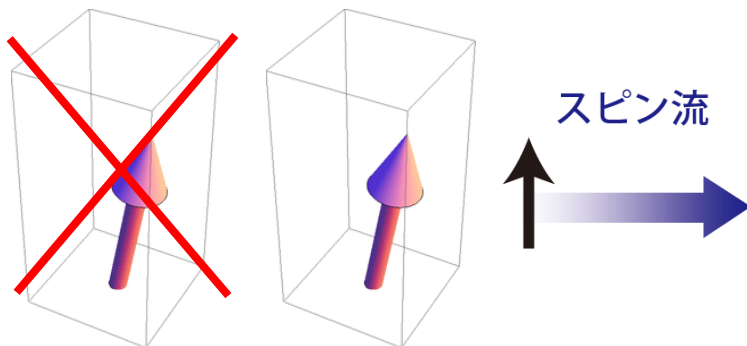


エンジン

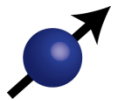


(images from wikipedia)

## スピンが本質的に持っている量子力学的性質を利用(2008~)

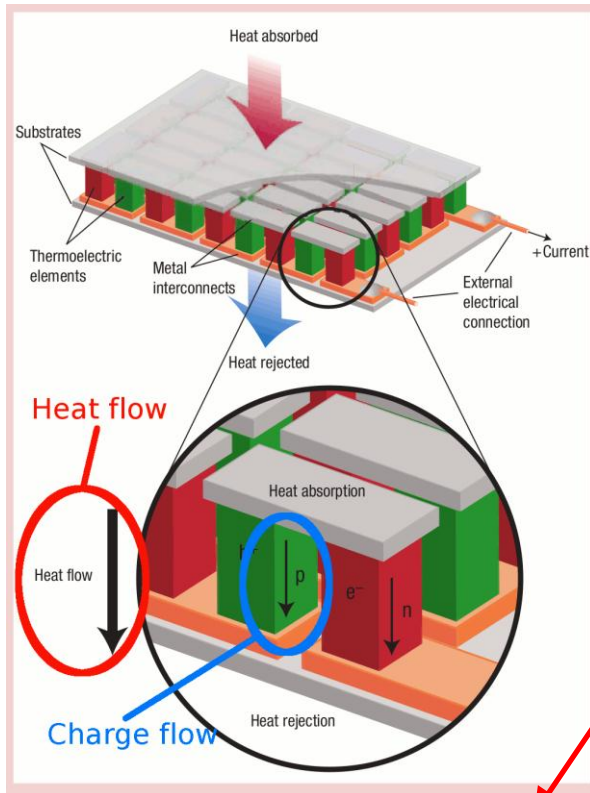


スピンの非相反性を用いれば、複雑な仕掛けや構造を用いることなく、乱雑な熱エネルギーを整流可能！



# ゼーベック熱電素子とスピンゼーベック熱電素子

## ゼーベック熱電素子



熱流と電流が平行に、  
同じ部分を流れる

性能指数

$$Z = S^2 \sigma / \kappa$$

[ S: 熱電能  
σ: 電気伝導率  
κ: 熱伝導率  
T: 温度 ]

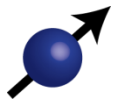
通常トレードオフ

実用化には  $ZT >$  が必須

Zは同じ物質の熱伝導率と  
電気伝導率によって決まる

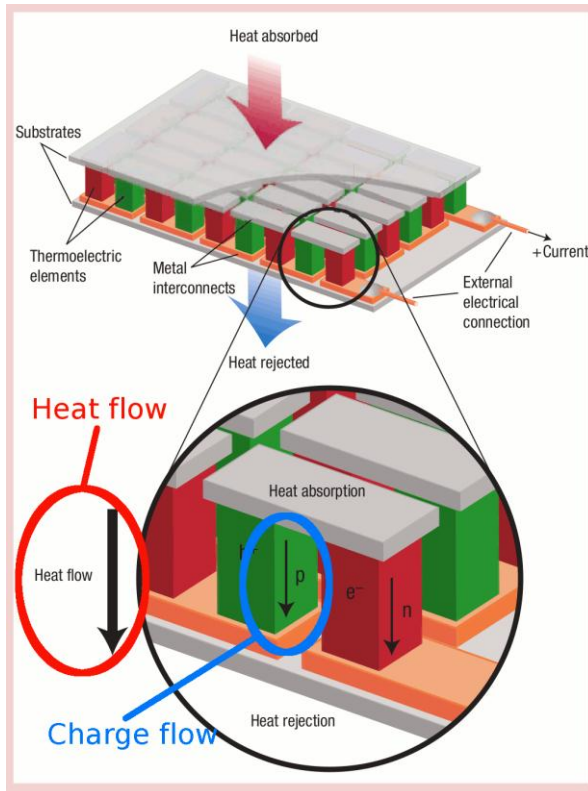


Wiedemann-Franz則 ( $\sigma / \kappa$  が一定)  
による原理的な効率が存在



# ゼーベック熱電素子とスピンゼーベック熱電素子

## ゼーベック熱電素子

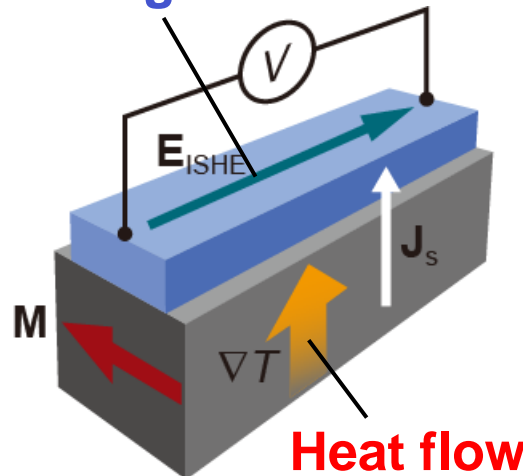


熱流と電流が平行に、  
同じ部分を流れる

## スピンゼーベック熱電素子

スピンゼーベック効果を用いれば、シンプルな試料構造を用いて、絶縁体を含む様々な物質からの熱電変換が可能に！

### Charge flow



性能指数：

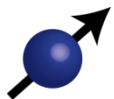
$$Z_S = S_S^2 \sigma_{Pt} / \kappa_{YIG}$$

金属層の  
電気伝導率

絶縁体層の熱伝導率

独立に設計可能！

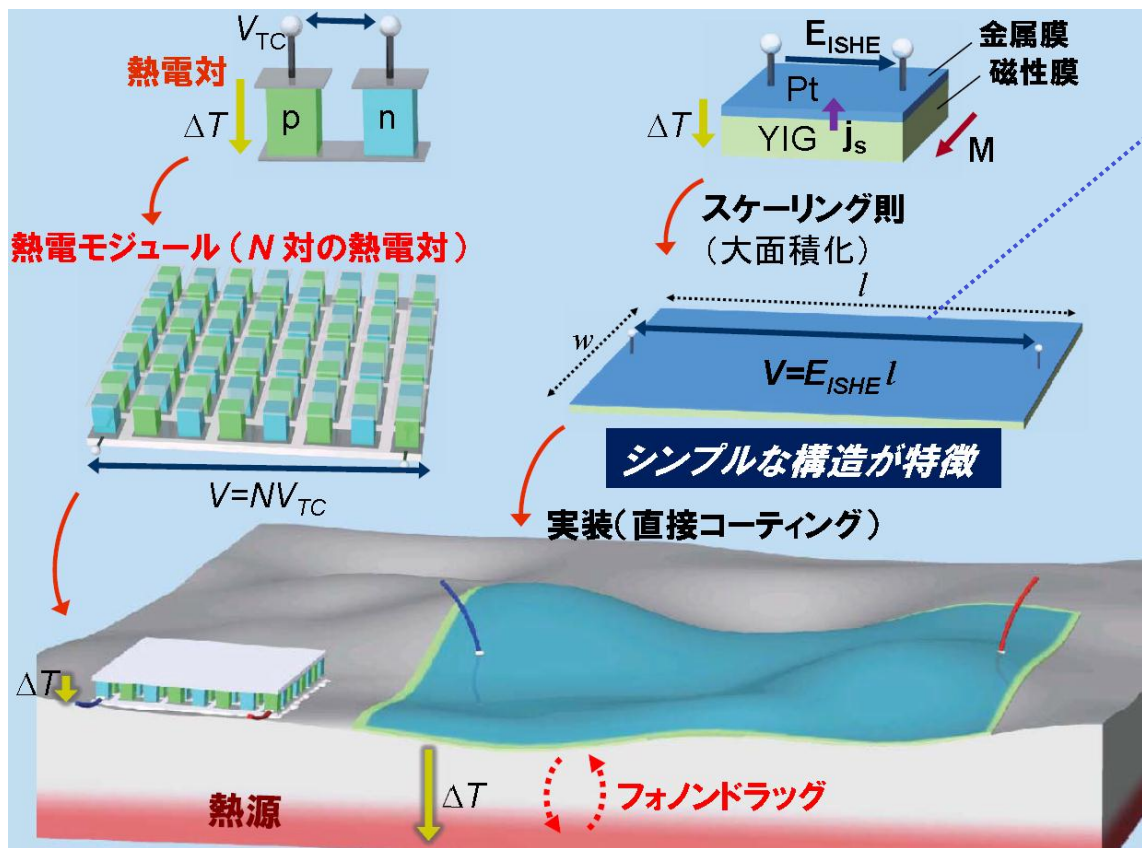
スピンを使うので熱流と電流が直交し、  
異なる部分を流れる



# あらゆる熱源からの熱電発電が可能に (NEC社との共同研究)

## ゼーベック素子

## スピンゼーベック素子



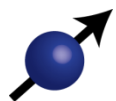
絶縁体におけるスピンゼーベック効果により複雑な構造が不要に！

+

スピンゼーベック素子の出力は面積に比例

塗布技術を応用すれば大面積からの熱電変換が可能に！

A. Kirihaara, K. Uchida *et al.*,  
Nature Materials (2012).



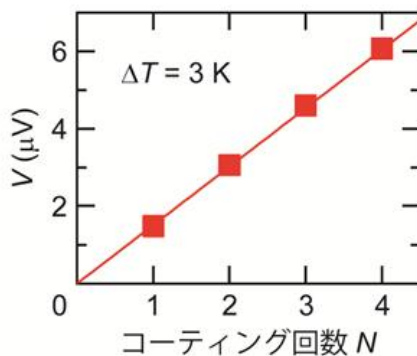
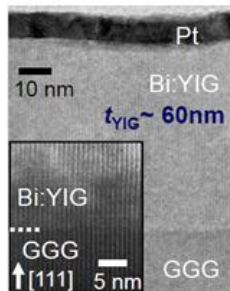
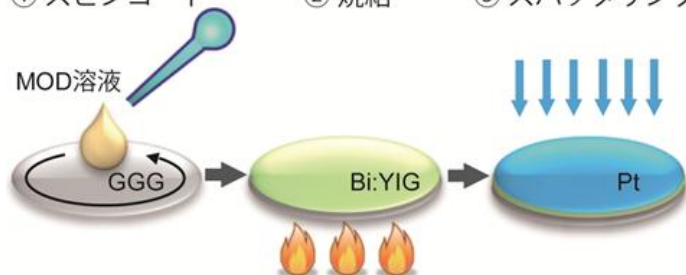
# スピナーベック熱電素子の実現に向けて

A. Kiriwara, K. Uchida *et al.*,  
Nature Materials (2012).

## MOD法を用いた 熱電コーティング

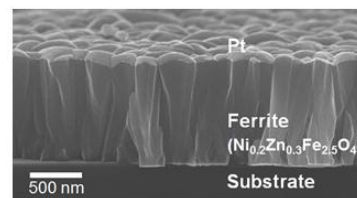
溶液を塗布して焼結させるだけで  
スピナーベック素子を作製可能

- ① スピンコート      ② 焼結      ③ スパッタリング

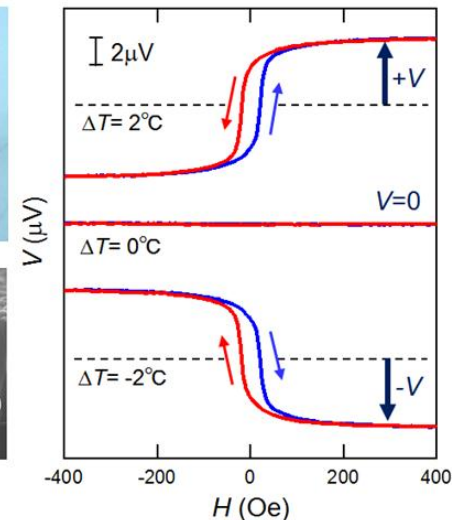


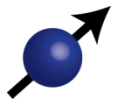
## フレキシブル基板への スピナーベック素子実装

フェライトめっき法を用いた  
磁性絶縁体薄膜の作製



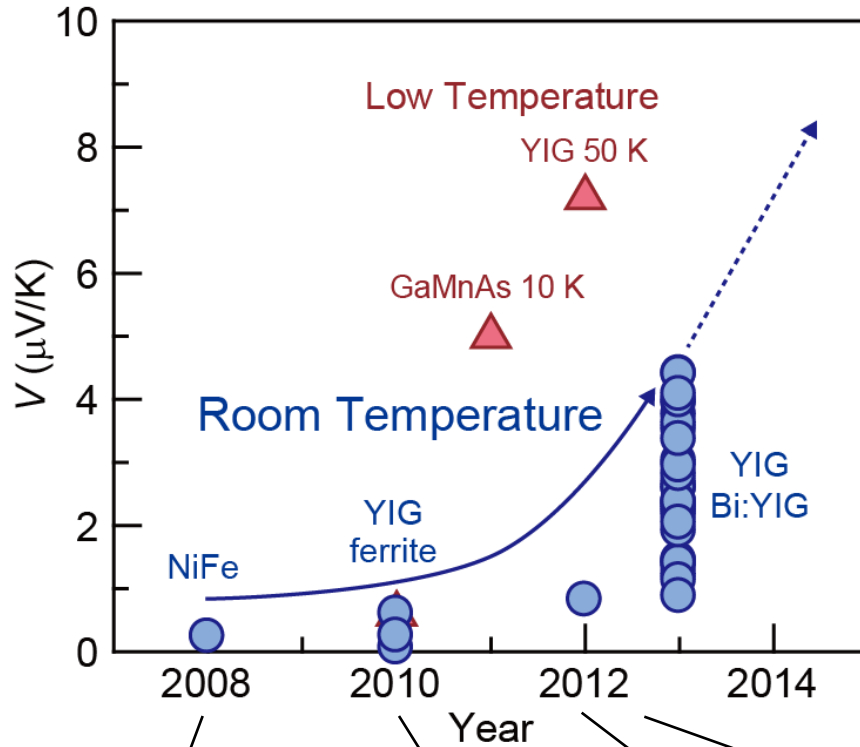
フレキシブルなポリイミド  
フィルム上に作製したスピ  
ナーベック素子





# スピンゼーベック熱電能向上への試み

※長さ4~6 mmの単層電極の場合



金属におけるスピンゼーベック効果の発見

絶縁体におけるスピンゼーベック効果の発見

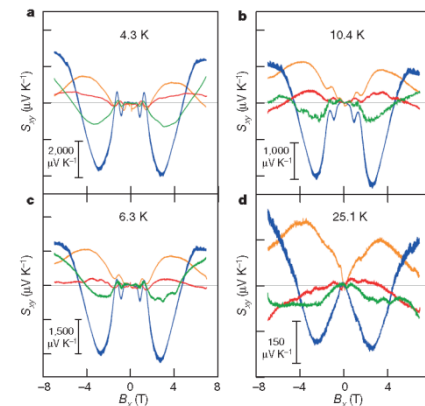
NEC社との共同研究開始

JSTさきがけ研究課題

「スピン流を用いた革新的エネルギーデバイス技術の創出」

スピンゼーベック効果による出力熱起電力は発見から5年間で20倍近く向上

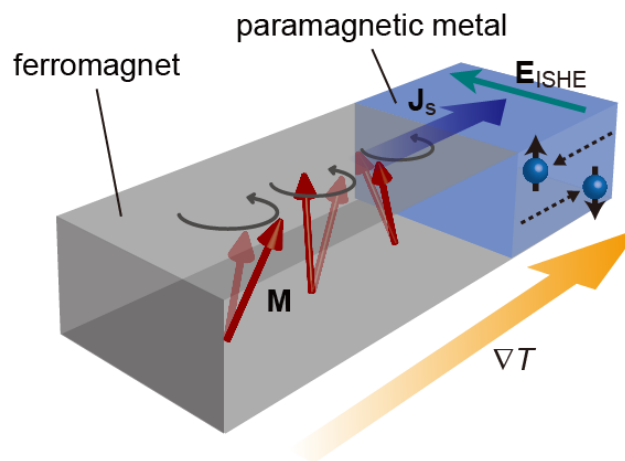
Giant SSE in InSb/Pt: 3000  $\mu\text{V}/\text{K}$  (< 5 K)  
C. M. Jaworski *et al.*, Nature (2012).





## 結論

- 本研究により、熱流からスピン流が生成される「スピンゼーベック効果」が発見された。スピンゼーベック効果を用いることで、従来技術では不可能だった「絶縁体を用いた熱電変換」を実現できる。
- スピンゼーベック効果を利用した絶縁体熱電変換技術を発展させれば、低コストで汎用性の高い熱電発電を実現できる可能性がある。



スピンゼーベック効果に関する主な発表論文：

[K. Uchida et al., Nature \*\*455\*\*, 778-781 \(2008\).](#)

[K. Uchida et al., Nature Materials \*\*9\*\*, 894-897 \(2010\).](#)

[K. Uchida et al., Applied Physics Letters \*\*97\*\*, 172505 \(2010\).](#)

[K. Uchida et al., Nature Materials \*\*10\*\*, 737-741 \(2011\).](#)

[A. Kirihara, K. Uchida et al., Nature Materials \*\*11\*\*, 686-689 \(2012\).](#)

[T. Kikkawa, K. Uchida et al., Physical Review Letters \*\*110\*\*, 067207 \(2013\).](#)



## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、大変多くの方々に御指導、御協力を頂きました。心より感謝申し上げます。

【東北大学】 齊藤英治先生、G. E. W. Bauer 先生、高橋三郎先生、吉川貴史氏  
太田岳氏、野中拳海氏(所属は在籍時)

【日本原子力研究開発機構】 前川禎通先生、安立裕人先生、家田淳一先生

【東邦大学】 大江純一郎先生

【日本電気株式会社】 桐原明宏氏、萬伸一氏、石田真彦氏、河本滋氏

【Fudan University】 Jiang Xiao先生、Xiaofeng Jin先生

【The University of Kaiserslautern】 Burkard Hillebrands 先生

その他、共同研究をさせていただいた多くの先生方、学生の皆様