

温度計を超える熱制御・熱検知を 実現する超低熱抵抗な熱流センサ

物質・材料研究機構(NIMS)

磁性・スピントロニクス材料研究センター

磁気機能デバイスグループ グループリーダー

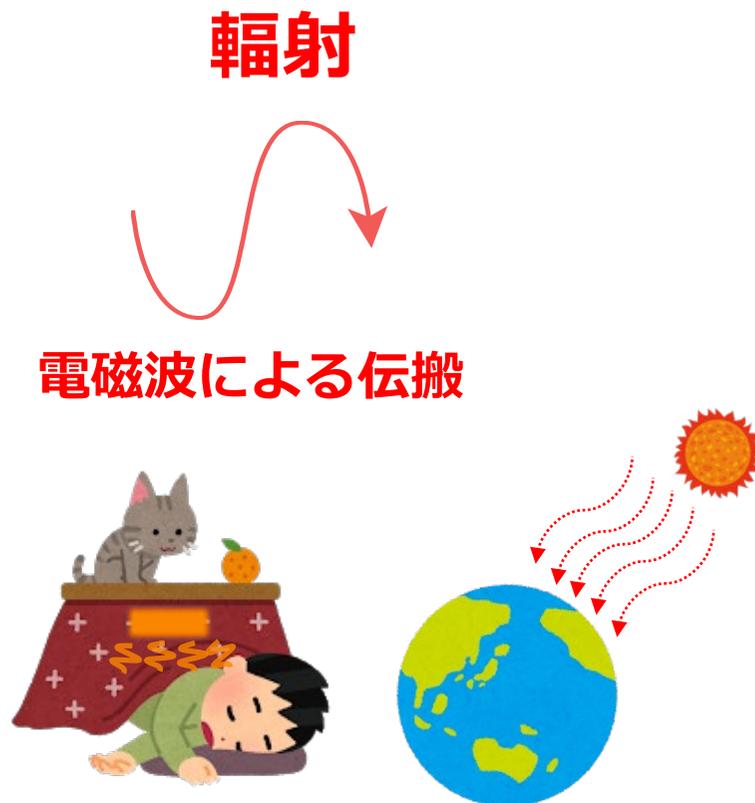
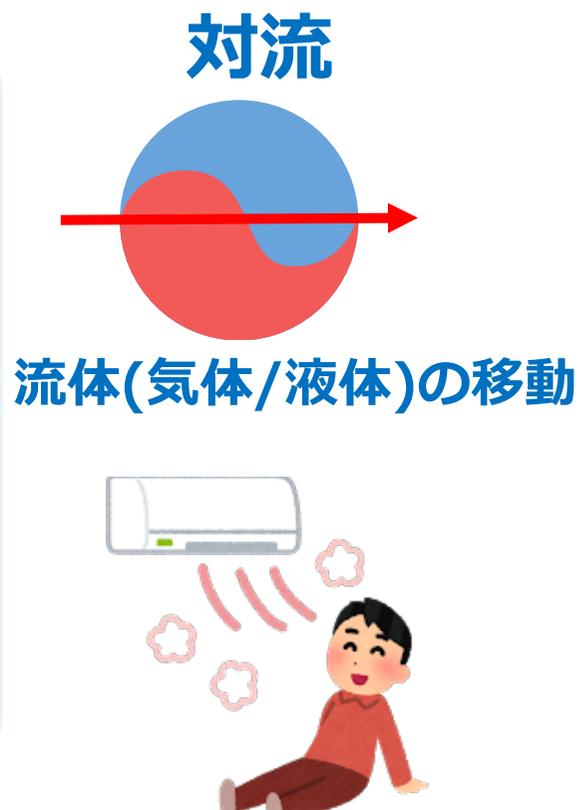
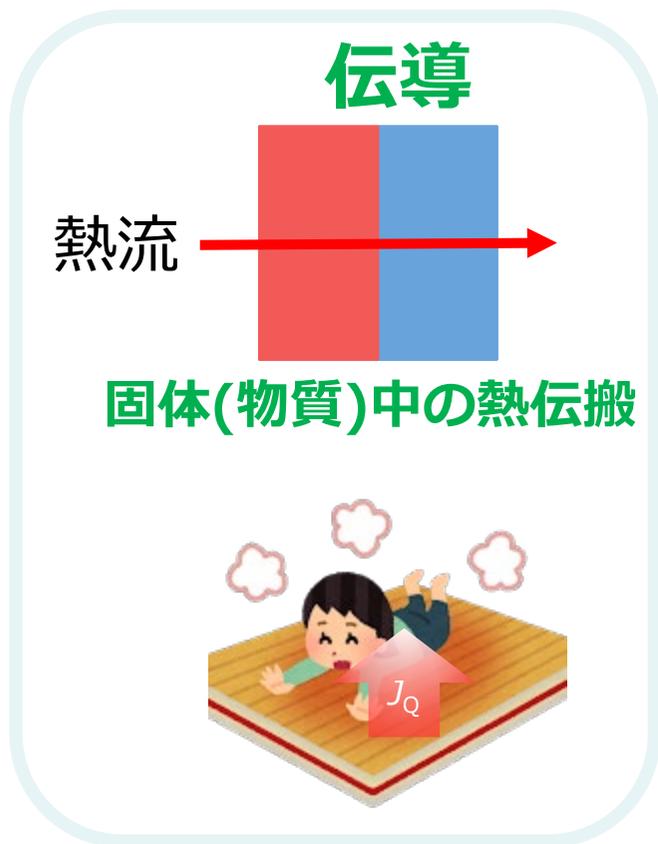
桜庭裕弥



2024年6月18日

伝熱の3形態

“熱”は 3つの形態が常に絡み合い伝播している
熱エネルギーが伝わった結果として、“温度”が変化する



熱流 = 熱エネルギーの流れ

熱流センサ：伝導によって伝わる熱流を計測するセンサ
汎用的に利用できる熱流センサは未だ実現されていない！

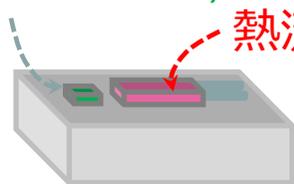
温度計と熱流センサ

伝導熱を観測できるセンサ → 熱流センサ

温度計
(サーミスタ、熱電対など)

熱流センサ

対象物



熱流入
 $-J_Q$

加熱

温度計：
物体の温度変化を捉える

温度

熱流密度

time

熱流密度
温度
 $+J_Q$
 $-J_Q$

冷却



熱流出
 $+J_Q$

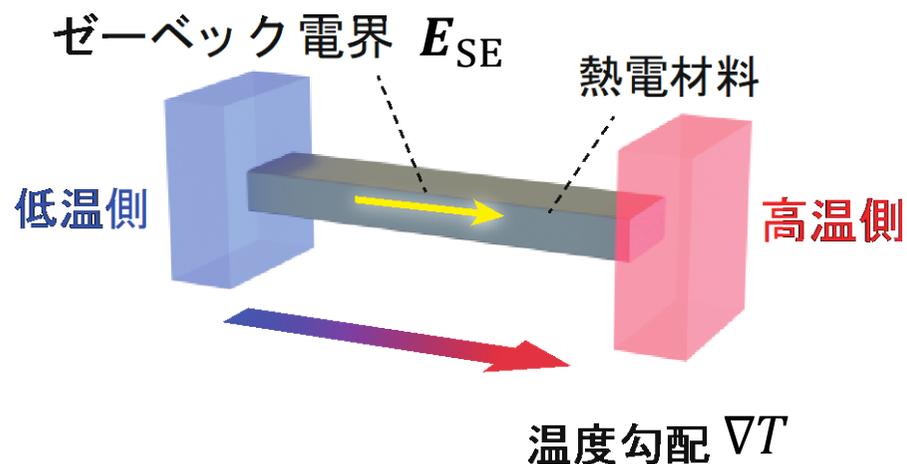
熱流センサ：

対象物を通過する熱流密度の“大きさ”と
“方向”をすばやく把握

ゼーベック型熱流センサ

一般的な熱電効果

ゼーベック効果 Seebeck effect (SE)

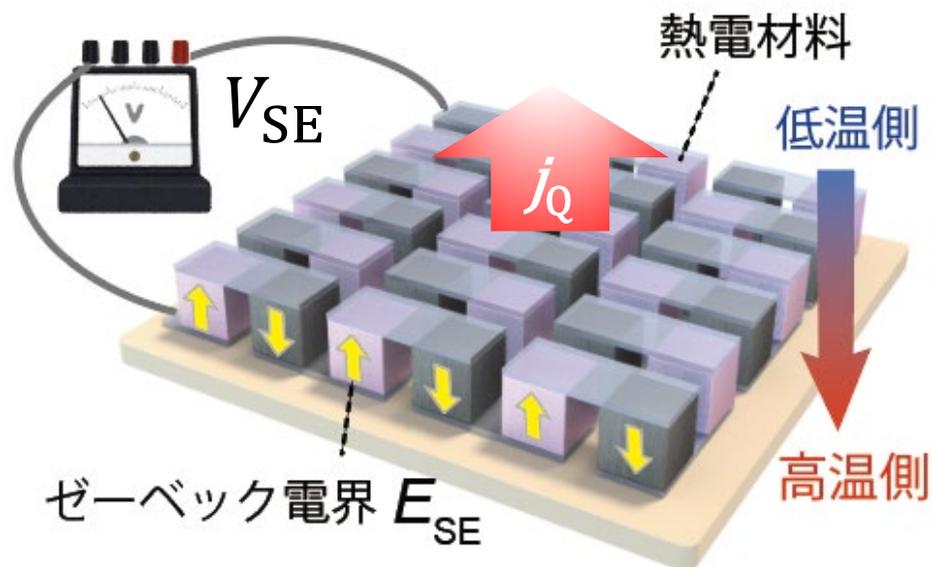


熱の流れと同じ方向に電界が生じる

$$E_{SE} = S_{SE} \nabla T$$

S_{SE} : ゼーベック係数 (V/K)

ゼーベック熱流センサ



$$V_{SE} = S_{SE} \nabla T L$$

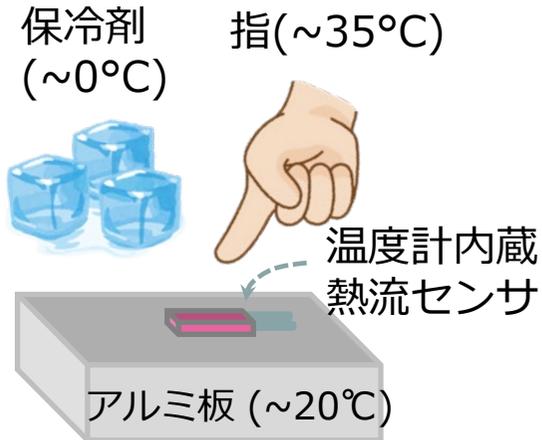
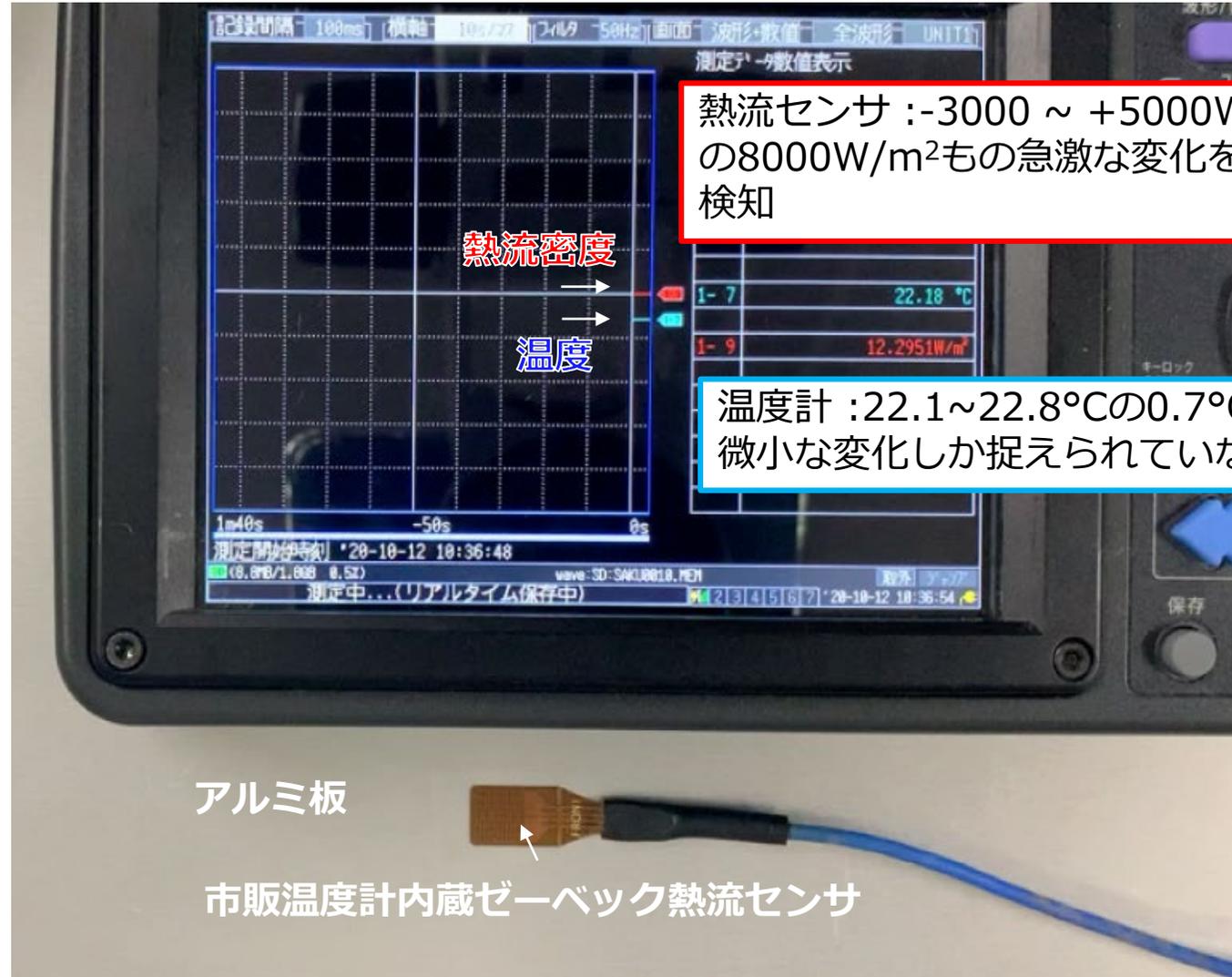
ゼーベック電圧

熱電対列の全長

$$j_Q = -\kappa \nabla T = -\frac{\kappa}{S_{SE} L} V_{SE}$$

ゼーベック電圧から熱流密度 j_Q を得ることができる

市販ゼーベック熱流センサの動作



熱流の“方向”と“大きさ”を計測。温度計よりも極めて高速かつ高感度

熱流センサはどんな用途に使えるのか？

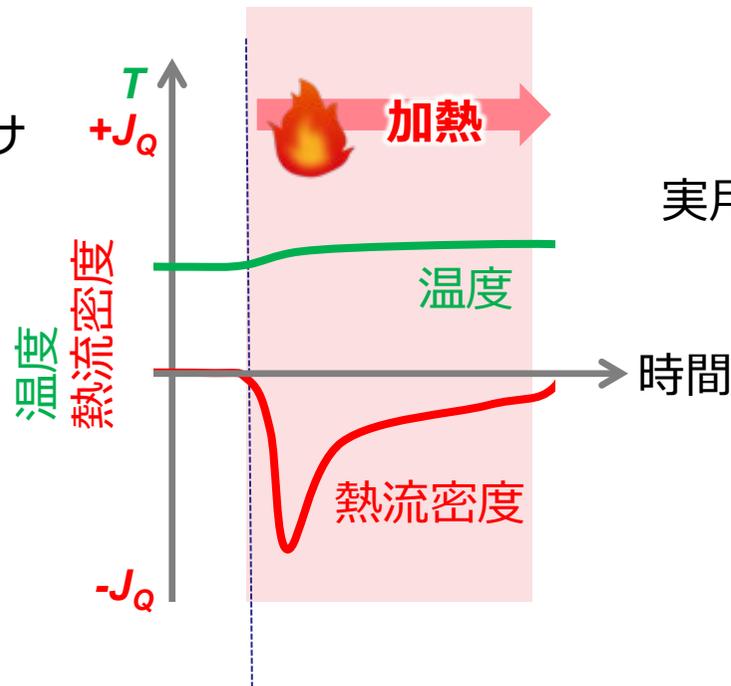
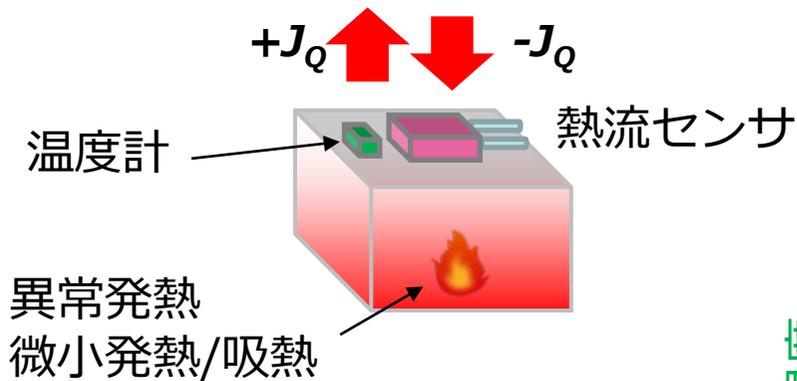
温度計の限界・問題

■ 応答が遅い



熱流センサの利点と期待される応用

- 応答が早い (原理的にはミリ秒以下の検出可能)
微小発熱・吸熱を高感度検知、異常発熱を高速検知
- 電子機器や機械の故障・劣化の検知
 - 事故の未然予防



実用例：熱流センサ付ベアリング

熱流センサはどんな用途に使えるのか？

温度計の限界・問題

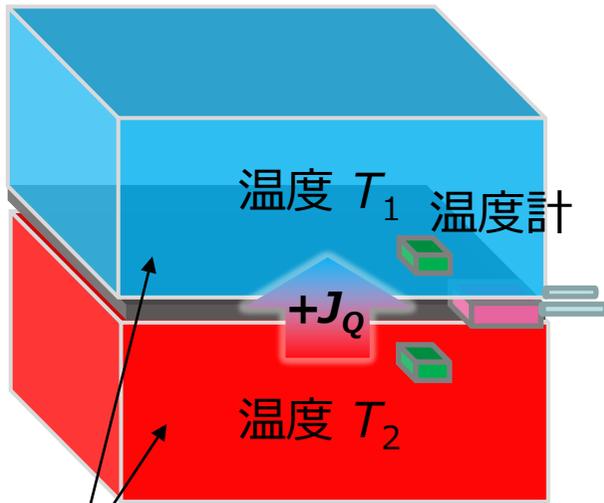
- 熱容量Cが大きいほど、温度変化鈍くなり、熱の出入りの管理(エネルギー管理)が困難



熱流センサの利点と期待される応用

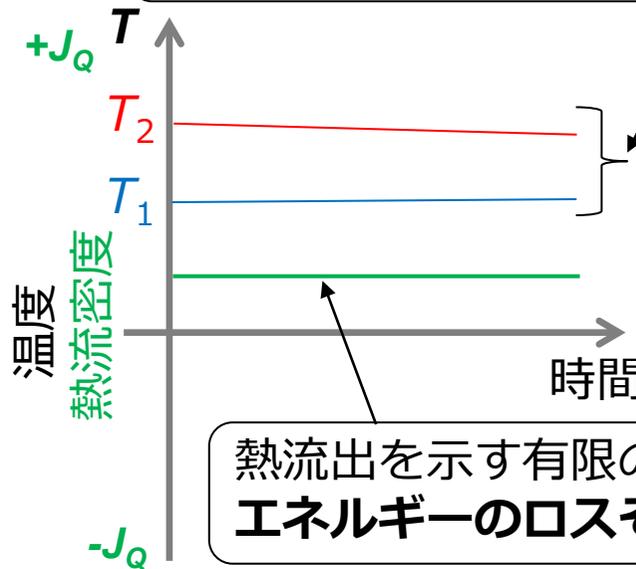
- 熱容量Cが大きな系でも熱流量の計測可能
→ 建物、自動車などと外気間のエネルギーロスの検出しより高効率な管理

$$T_1 < T_2$$



熱容量Cが非常に大きい

温度の時間変化はほとんど生まれない
 T_1 か T_2 だけの計測では、熱の出入りは検知できない。



熱流出を示す有限のシグナルが捉えられる。
エネルギーのロスそのものを定量計測可能

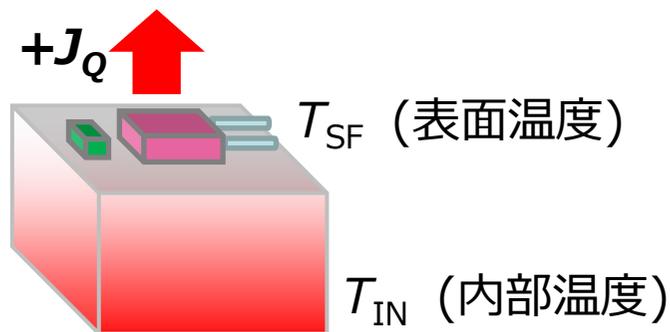


省エネルギー技術への展開
ZEHへの貢献

熱流センサはどんな用途に使えるのか？

温度計の限界・問題

- 表層の温度 T_{SF} のみ計測可能



- 電流供給が必要

熱流センサの利点と期待される応用

- 熱流の方向と量の直接計測
→ 内部温度 T_{IN} の計測可能

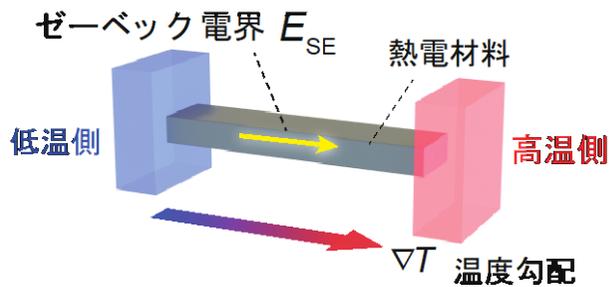


深部体温計などへの応用

- 熱電を原理とし無電源で動作
→ IoT用途との高い適合性

ゼーベック型熱流センサの利点と課題

ゼーベック効果



$$E_{SE} = S_{SE} \nabla T$$

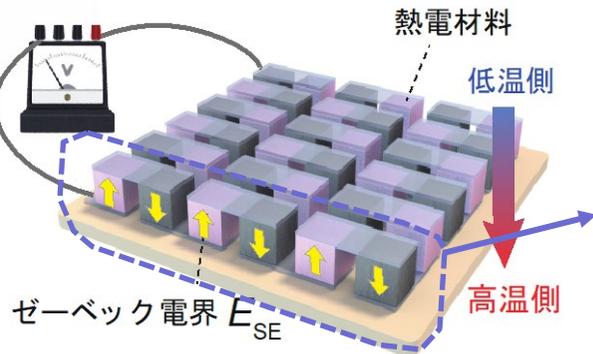
S_{SE} : ゼーベック係数

利点

熱電材料 $S_{SE} > 100 \mu\text{V}/\text{K}$

- 高い感度 $1 \sim 10 \mu\text{V}/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$

従来型ゼーベック熱流センサ



100~1000 μm

$V_{SE} = S_{SE} \nabla T h = S_{SE} \Delta T$

h

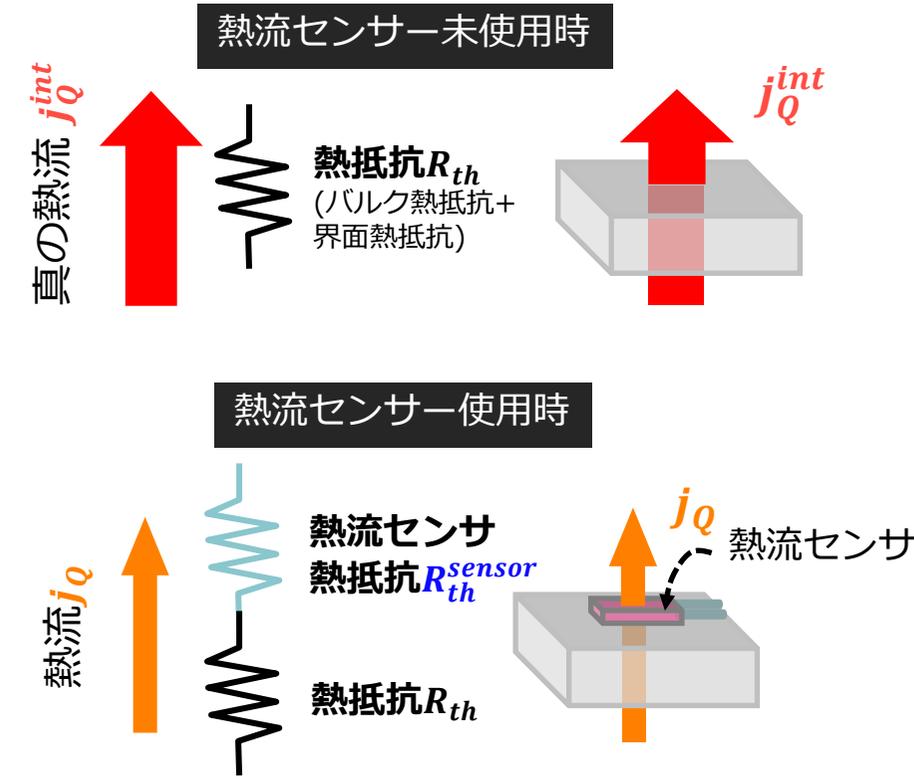
バルク体の面直接続構造

課題

複雑な構造、厚くないと感度が出しにくい

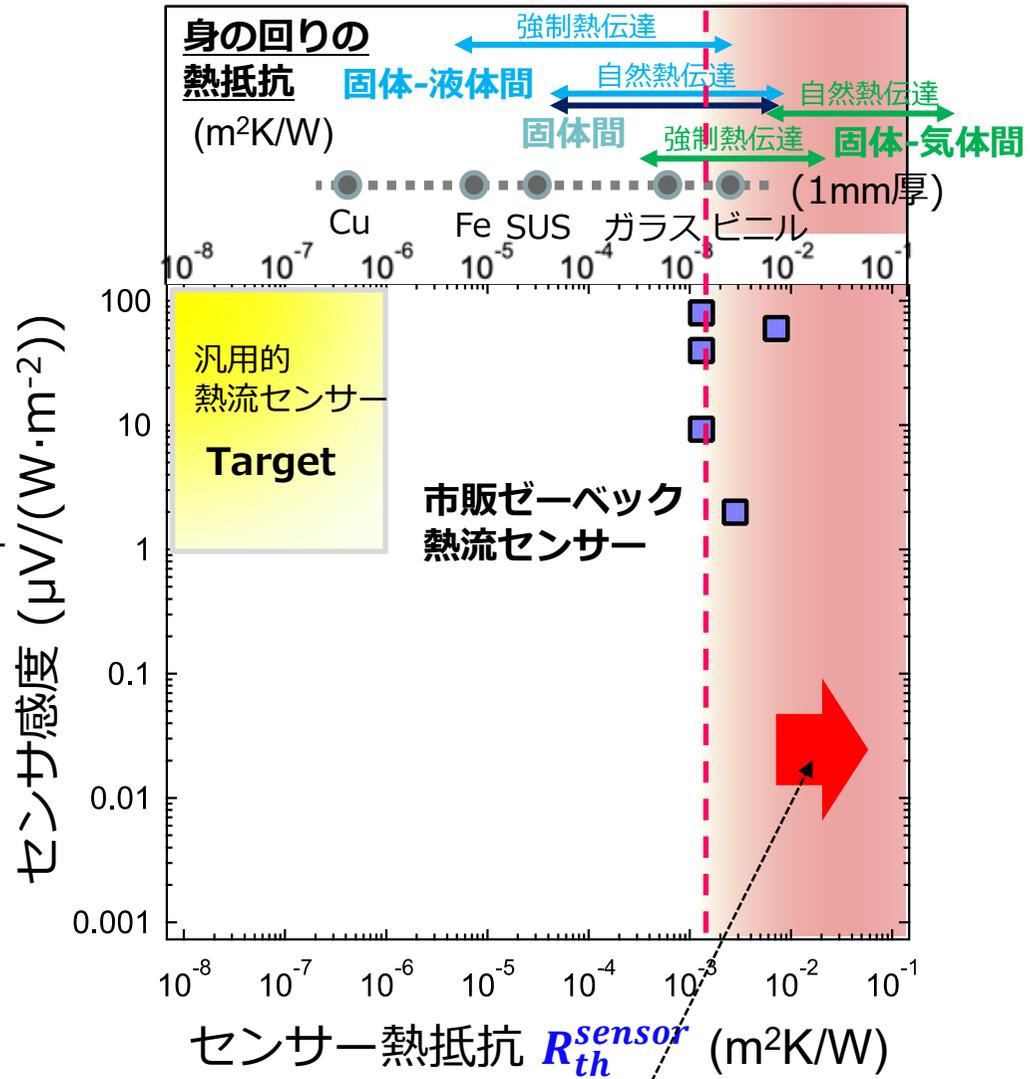
- 高コスト (>数万円 ~ 数十万円)
- 耐久性が低い
- フレキシビリティが低い (曲率半径 > 2cm)
- 大面積化や微細化困難
- 熱抵抗が高い

ゼーベック熱流センサの熱抵抗と感度



センサ熱抵抗 R_{th}^{sensor} が大きいと...

- ・ 真の熱流 j_Q^{int} の測定不可
- ・ 通熱・放熱の阻害
- ・ センサ応答速度の遅延



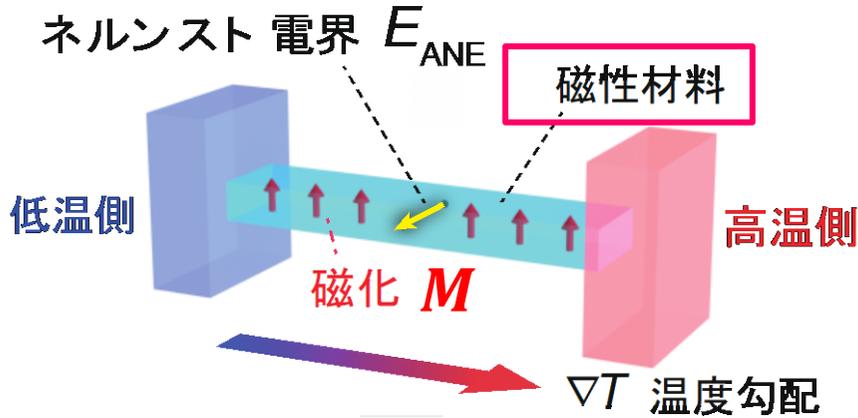
ゼーベック熱流センサが j_Q^{int} に影響を与えず計測できる熱抵抗領域は非常に狭い



用途は限定的

新技術：異常ネルンスト型熱流センサの利点と課題

異常ネルンスト効果 Anomalous Nernst effect (ANE)



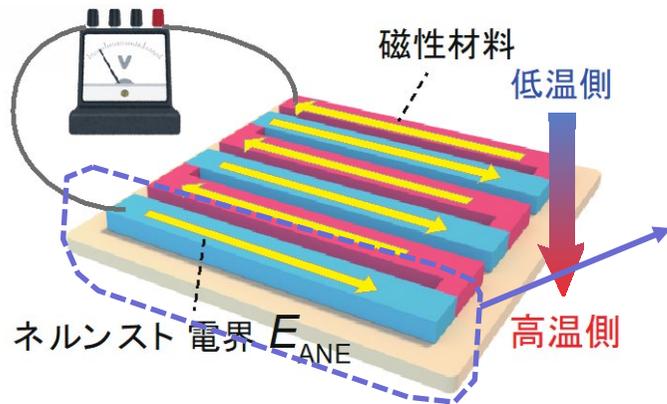
$$E_{ANE} = S_{ANE} \nabla T \times \left(\frac{M}{|M|} \right)$$

S_{ANE} : 異常ネルンスト熱電能

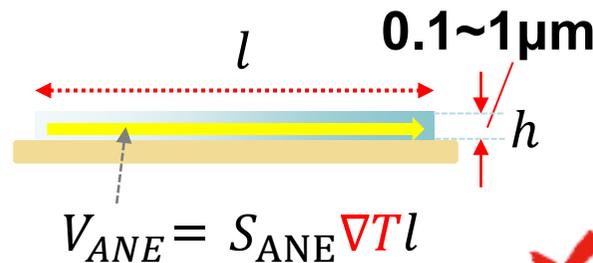
M : 磁性体の磁化

外部磁場は不要!

異常ネルンスト熱流センサ



薄膜の面内接続構造



利点

シンプルな面内接続構造
薄膜でも作製可能

- 低コストが期待
- 高耐久性
- 高フレキシビリティ
- 超低熱抵抗

課題

磁性材料 $S_{ANE} < 10 \mu\text{V/K}$

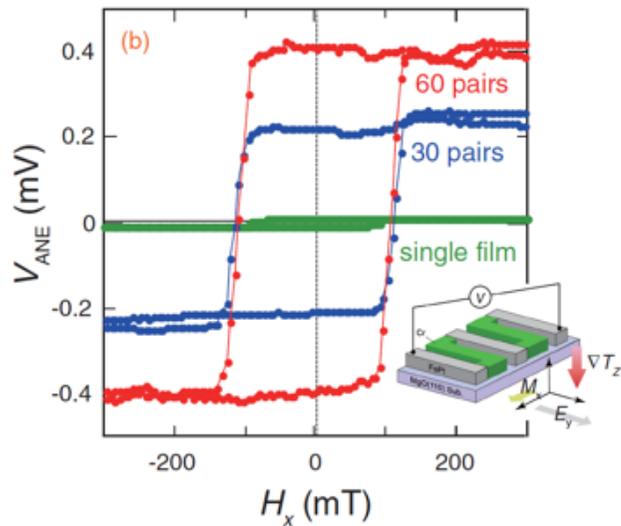
- 感度が低い

研究：磁性材料薄膜を用いた横型サーモパイルの試作

2013年、面内接続構造におけるANE電圧増強のデモンストレーション

Y. Sakuraba, K. Hasegawa, K. Takanashi et al.,
App. Phys. Express 6, 033003 (2013)

特許登録 (No. 6079995)

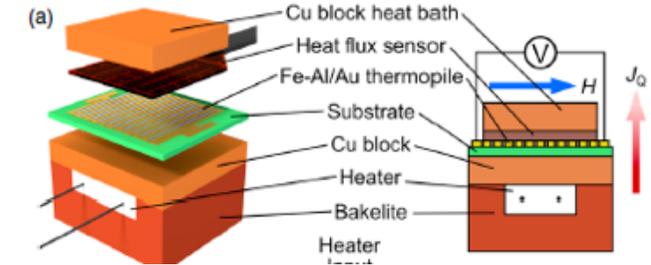


Thermopiles with 5 μ m-width FePt and Cr wires

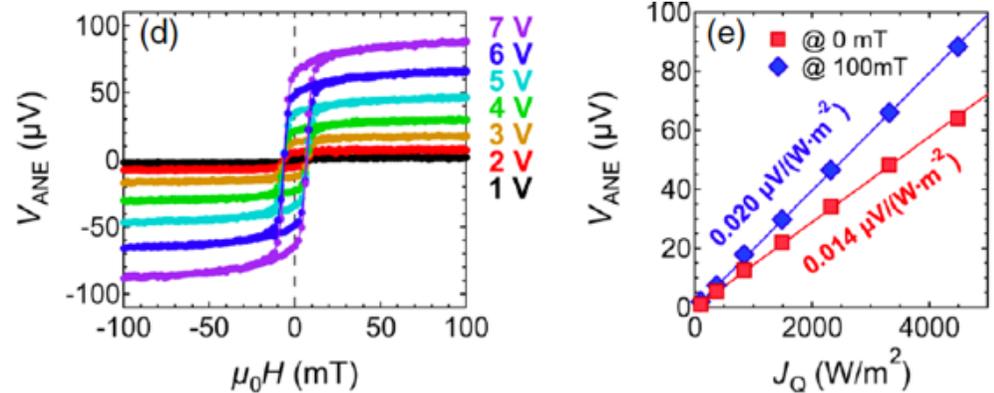
FePt磁性線の数に比例して、ネルンスト電圧が増加

2018年、フレキシブルANE熱流センサを用いた熱流センシングの初実証

Y. Sakuraba, H. Nakayama, 日本熱電学会 Sep. (2018)
W. Zhou, Y. Sakuraba, 13, 043001 (2020)



Fe-Ga, Fe-Al線を用いたANE系熱流束センサの試作



ネルンスト電圧が熱流密度に対して線形に変化

ただし感度は1W/m²の熱流束に対して10⁻² μ Vと小さかった

*ゼーベック熱流センサの1/100以下..

2017-2021年 NEDO未踏チャレンジ2050
2022-2023年 JST A-STEP 本格型FS

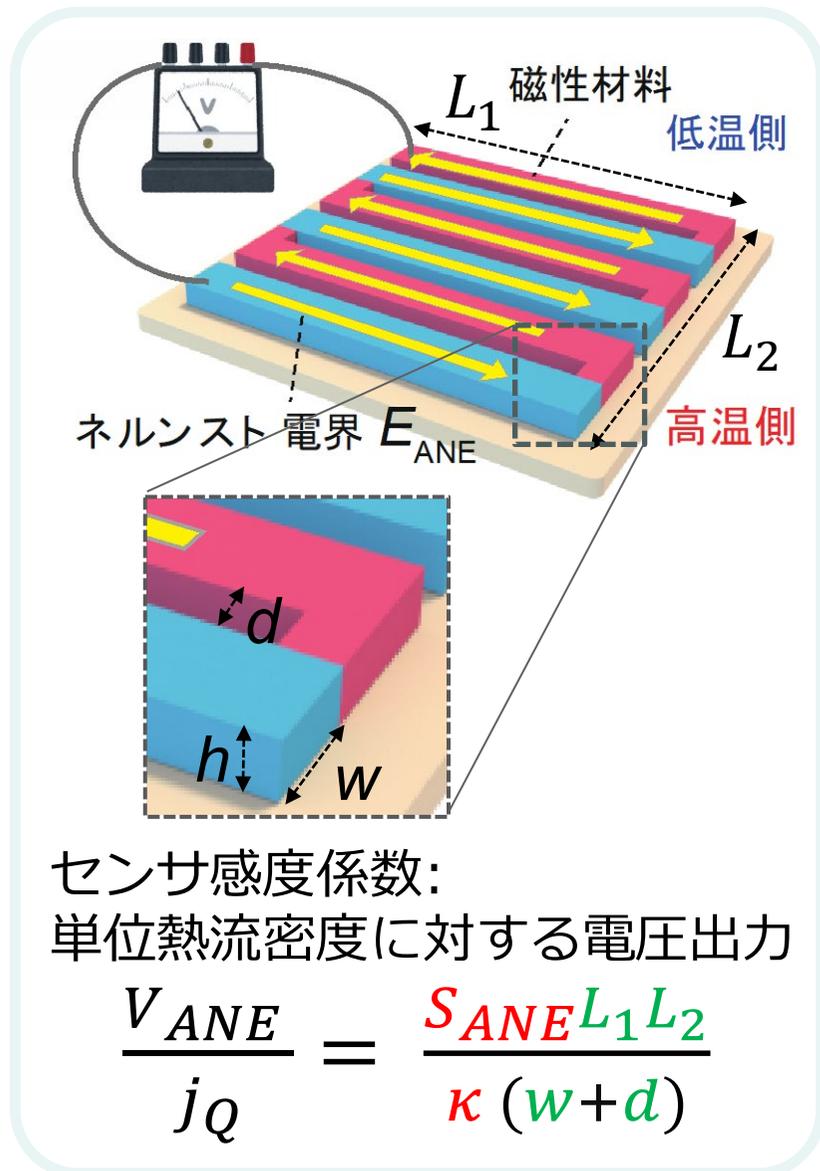


センサー開発についてSEMITEC社との共同研究



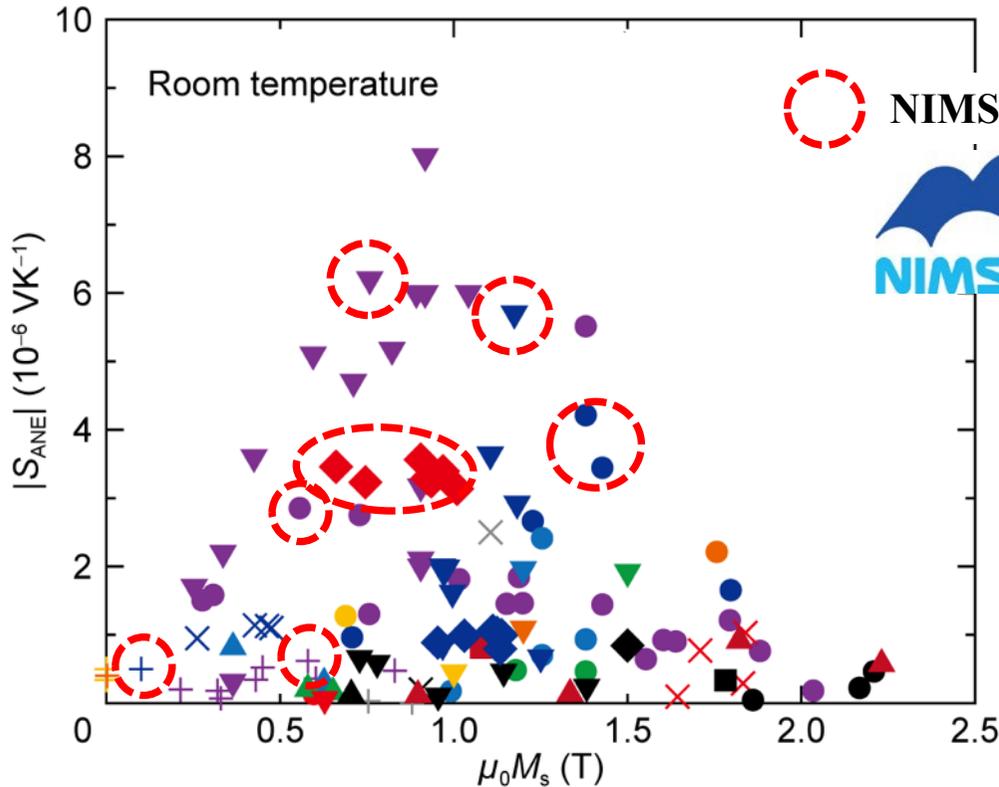
センサー感度向上には2つアプローチ

- ①大きな異常ネルンスト熱電能 S_{ANE} + 低い熱伝導率 κ を有する磁性材料の探索
- ②センサーのサイズ $L_1 \times L_2$ を大きくし、幅 w と線間距離 d を小さくする
* ただし、電気的な内部抵抗 R が増大し、熱雑音問題が顕著になるため限度がある



異常ネルンスト効果の熱電能@室温のまとめ

K. Uchida, W. Zhou, Y. Sakuraba, *Appl. Phys. Lett.* (2021)



- | | | | | |
|---|---|--|---|--|
| ● Fe film / slab | ▲ Ni slab* | ▼ Co ₂ MnSi film | + MnGa film | ◆ SmCo ₅ -type magnet slab* |
| ● Fe _x Ga _{1-x} film / slab | ▲ Ni _x Fe _{1-x} slab* | ▼ Co ₂ MnGa film / slab | + Mn ₃ Sn slab | ◆ Sm ₂ Co ₁₇ -type magnet slab* |
| ● Fe _x Al _{1-x} film / slab | ▲ Ni _x Pt _{1-x} slab* | ▼ Co ₂ MnAl _x Si _{1-x} film | + Mn ₃ Ge slab | ◆ Nd ₂ Fe ₁₄ B-type magnet slab* |
| ● FePt film / slab* | ▲ Ni _x Pd _{1-x} slab* | ▼ Fe ₂ CoAl slab | + Mn ₅ Ge ₃ C _{0.8} film | × |
| ● FePd film | ■ Co slab | ▼ Fe ₂ CoGa slab | + Mn ₄ N slab | × |
| ● Fe ₃ Sn ₂ film | ■ CoFeB film | ▼ Fe ₂ NiAl slab | | × |
| ● Fe ₄ N film | | ▼ Fe ₂ NiGa slab | | × |
| ● Fe ₃ O ₄ slab | | ▼ NiMnSb film | | × |

■ NIMSでの材料研究成果

Co₂MnGa thin film : 6.2μV/K

K. Sumida, Y. Sakuraba, et al., *Comm. Mat.* (2020)

Co₂MnAl_{0.67}Si_{0.33} thin film : 5.8μV/K

Y. Sakuraba, et al., *Phys. Rev. Mat.* (2020)

Fe₈₂Al₁₈ thin film : 3.7μV/K

Zhou & Sakuraba *APEX* (2020) 安価な元素。室温でスパッタ成膜した

Fe₆₈Ga₃₂ thin film : 2.4μV/K

H. Nakayama, Y. Sakuraba, et al., *Phys. Rev. Mat.* (2019) だけで比較的大きな熱電能

Mn₆₂Ga₃₈ thin film : -0.6μV/K + High magnetic anisotropy

W. Zhou, Y. Sakuraba et al *Appl Phys. Lett.* (2021)

Mn₄N thin film : 0.5μV/K + High magnetic anisotropy

S. Isogami, Y. Sakuraba et al *Appl. Phys. Lett.* (2021)

現在までの最大値 ~8μV/K@室温
> 10 μV/K が目標

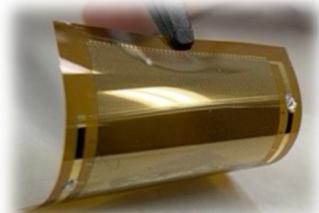
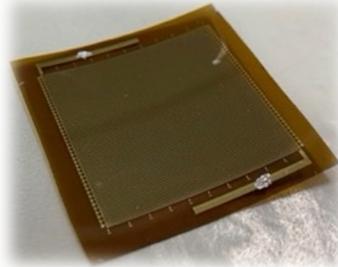
■ 横熱電能を高める新手法を考案・実証：磁性材料 + 熱電材料のハイブリット構造

磁性材料と熱電材料の閉回路構造：Co₂MnGa + Si 81μV/K 特許第7371980号

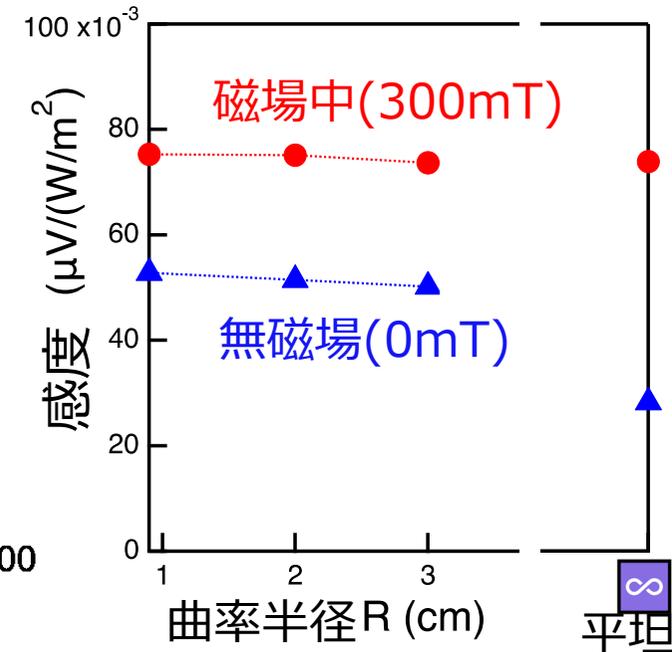
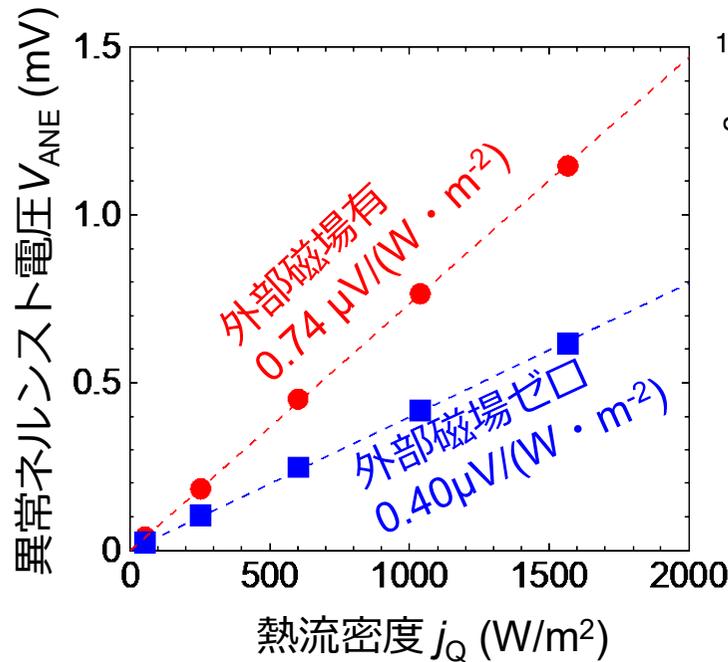
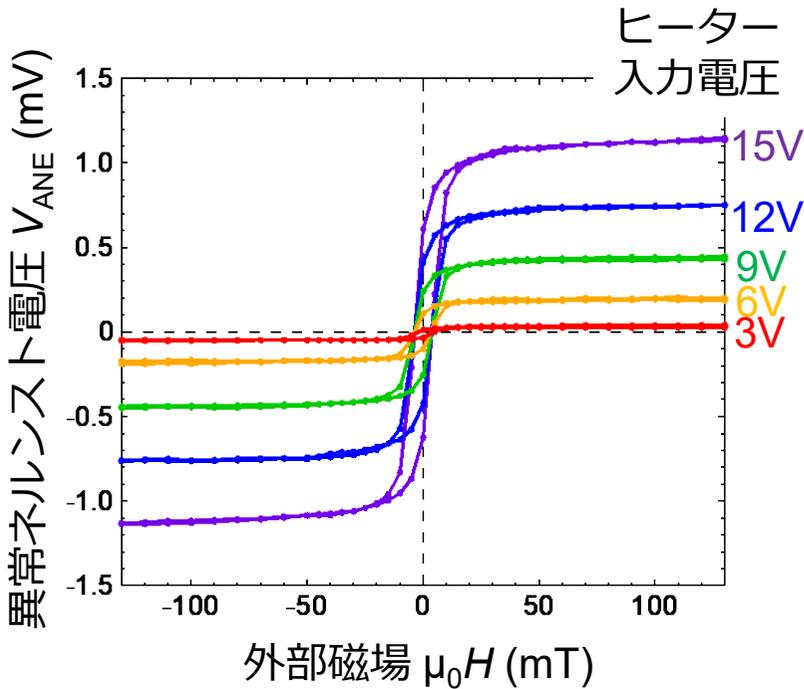
磁性材料と熱電材料の積層構造：Co₂MnGa + Si 15μV/K 特許出願 特願2023-109605

センサの感度向上に向けて① 大面積・フレキシブルセンサの試作と動作検証

センサ試作プロセス
フォトリソグラフィ
→スパッタによる成膜
→リフトオフ

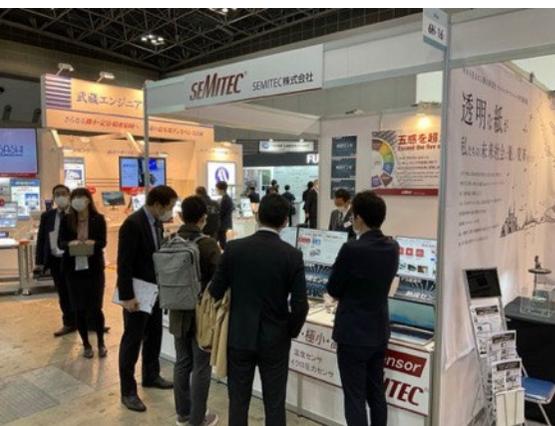


基板：ポリイミドフィルム (50 μ m厚)
サイズ：3x3 cm²
磁性細線材料：Fe-Ga不規則合金
線幅100 μ m x 88本



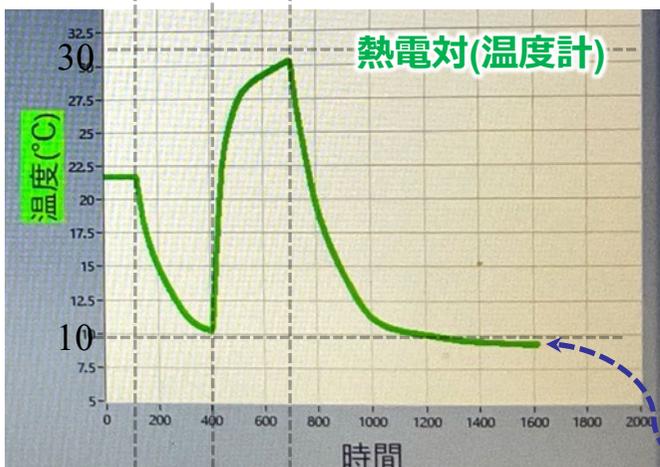
- フレキシブル異常ネルンスト熱流センサの感度を初期プロトタイプから**30倍向上**
- 曲率半径0.9cm**でも感度変動なく、熱流検知が可能 (ゼーベック熱流センサの倍以上曲げやすい)

J-FLEX2022 にて異常ネルンスト熱流センサのデモ展示 (2022年1月)

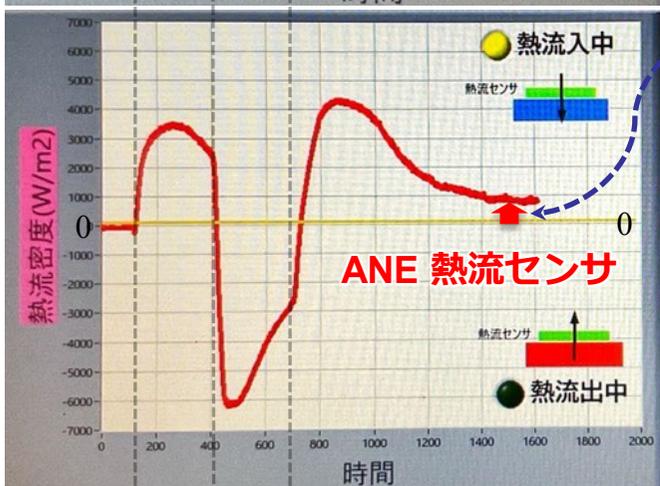
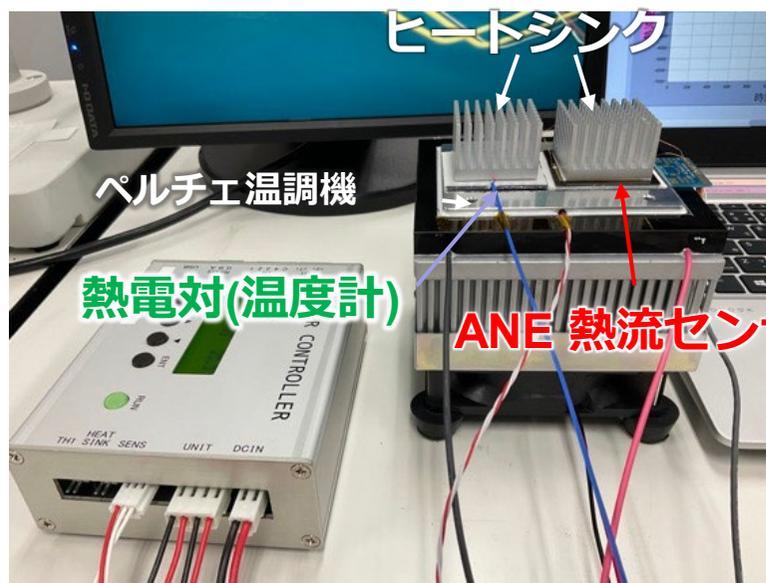


22°C
35°C
10°C 10°C
温調機の設定温度

J-FLEX2022
東京ビッグサイト 東ホール



- 外部磁場ゼロでも熱流の流入/流出の高速検知できる感度が実現



- 温度の時間変化が微小な平衡状態に近い領域でも熱流の存在を検知

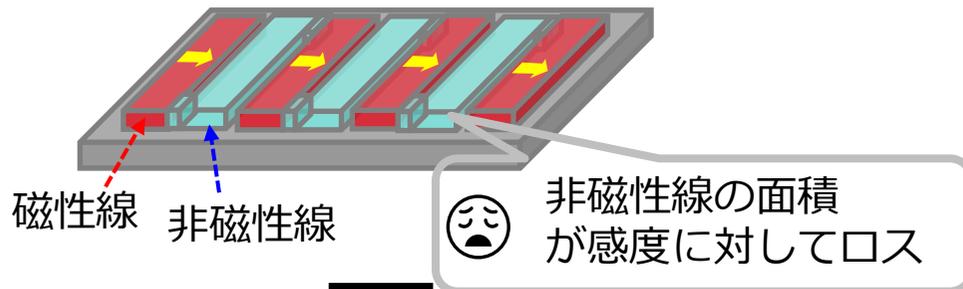


熱流センサが熱エネルギーのロスをとらえている

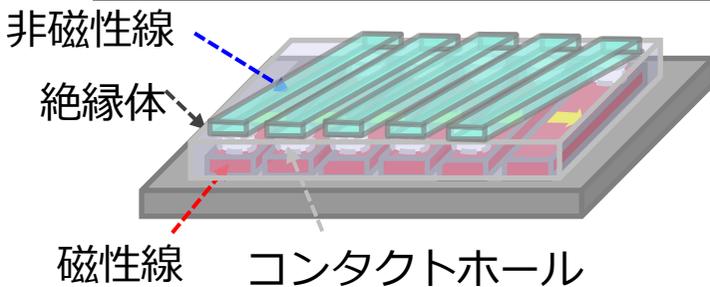
外部磁場ゼロでの動作デモ

センサの感度向上に向けて② 積層型センサの考案 - 試作と動作検証

従来型ANE熱流センサー (ユニレグ型)

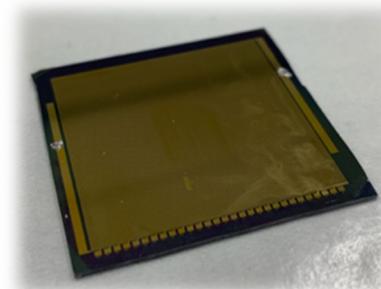


新規構造：積層型熱流センサー



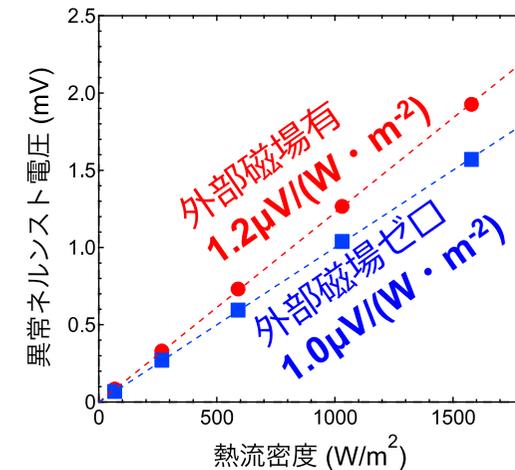
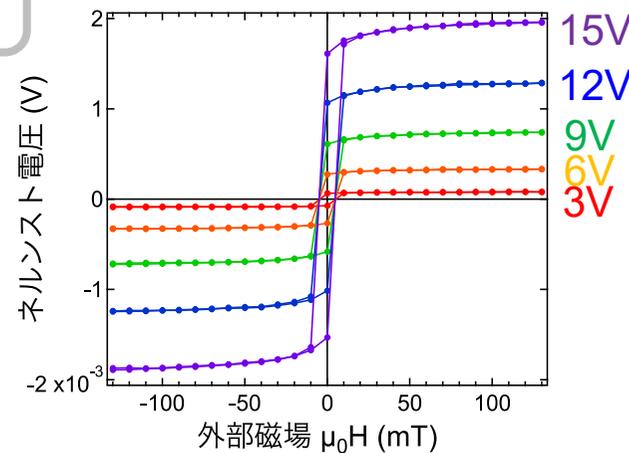
1つの磁性材料で面積ロスなく感度向上が可能。
磁極が隣接し残留磁化が安定化。

桜庭裕弥、他 特願2021-098950



基板：熱酸化膜付Si基板
サイズ：3x3 cm²
磁性細線材料：Fe-Ga不規則合金
線幅180μm x 150本

ヒーター入力電圧

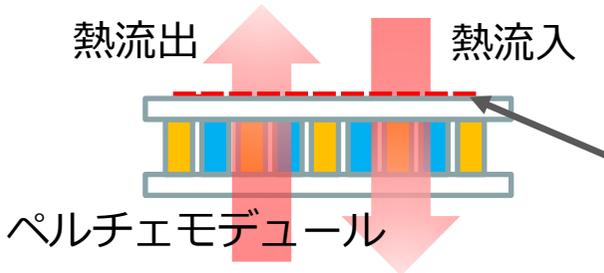
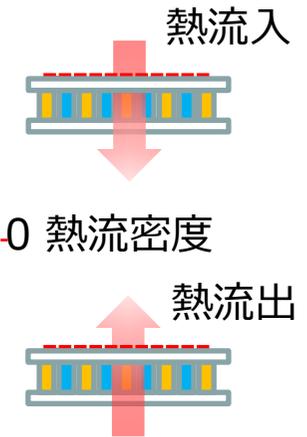
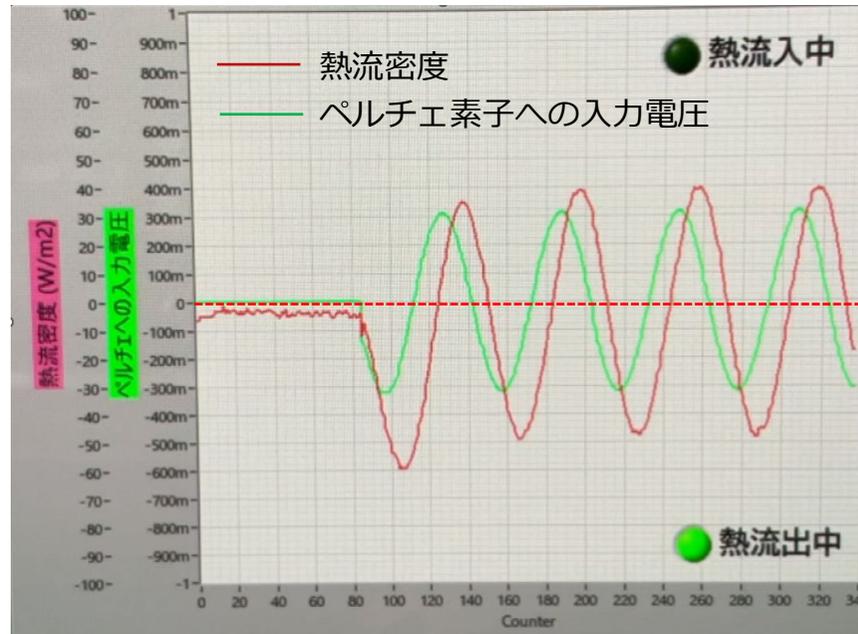
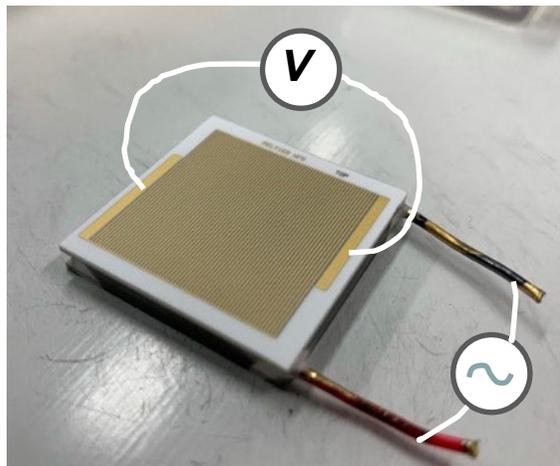


外部磁場ゼロでも過去最高の $1\mu V/(W \cdot m^2)$ を実現
ゼーベック熱流センサに匹敵する感度

基板フリー超低熱抵抗熱流センサの試作と動作検証

被対象物に直接形成した“基板フリー”のネルンスト熱流センサ：**究極の低熱抵抗センサ**

ペルチエモジュールに交流電圧を印加し、熱の流入と流出を高速検知



ペルチエモジュールに直接形成したネルンスト熱流センサは
厚さ300nmの金属薄膜 [桜庭裕弥、他 特願2022-079882](#)

センサ熱抵抗は $10^{-9} \text{W}^2\text{K/W}$ (従来熱流センサより6桁低い)と極めて小さい



ペルチエモジュールの性能に一切影響を与えず、
モジュールを通過する熱流の**超高速**かつ**高感度**な定量計測が可能

まとめ - 企業の皆様へのお願い

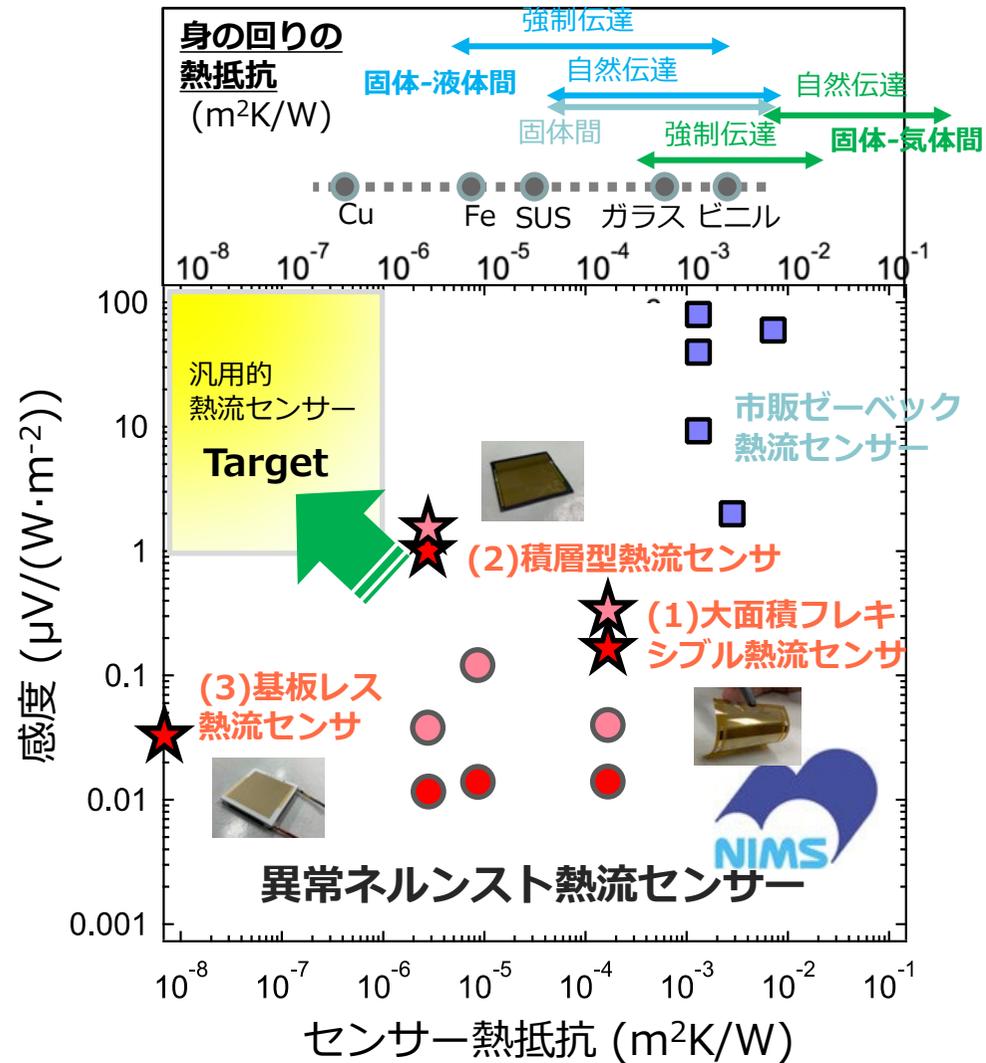
★ 磁場有
★ 磁場無

- 磁性材料の熱電効果“異常ネルンスト効果”を利用することで、低熱抵抗、高フレキシビリティ、低コストな汎用熱流センサの実現が期待
- 最近、大きな熱電能を示す材料が開拓され、またセンサーの構造が改善されたことで高感度化や低熱抵抗化は飛躍的に向上している

“熱流”と“温度”は本質的に異なる

熱流計測することで、温度計測ではできなかった革新的な制御や検知ができる

- 微小な熱・異常発熱の高速・高感度な応答性
→ 事故・故障の予測・予防、緻密な温度制御
- 温度が変わらなくても熱エネルギーは流れている
→ 各種省エネルギー技術への応用



無償での熱流センサの貸出可能。
用途に応じて、センサ設計も承ります。
センサをご使用希望の方・興味のある方はぜひNIMS 桜庭へご相談ください



お問い合わせ先

国立研究開発法人物質・材料研究機構
外部連携部門 企業連携室

企業様向け総合窓口HP(スマホ対応)

<https://technology-transfer.nims.go.jp/>

