

令和 6 年 5 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01868

研究課題名（和文）磁気モーメントの変化によるエネルギーハーベスティングセンサ構築に向けた基礎研究

研究課題名（英文）Development of energy harvesting sensors using magnetic moment change

研究代表者

甘蔗 寂樹（KANSHA, YASUKI）

東京大学・大学院総合文化研究科・准教授

研究者番号：10544083

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,100,000円

研究成果の概要（和文）：常磁性体と強磁性体の転移に伴う磁気モーメントの変化を用いて電磁誘導により発電する環境発電と計測対象の情報を取得するセンサを統合したエネルギーハーベスティングセンサ構築を目的として、基礎研究を実施した。提案するセンサに用いる磁性体の特性を実験により把握し、その特性を活かして、センサ性能の向上を図るとともに、非接触で計測対象を測定することが可能なセンサの構築を行った。また、提案するセンサに適した磁性体の探索を行い、得られた磁性体を実際に調製して、実験装置に導入し、計測を行った。以上の検討から、提案するエネルギーハーベスティングセンサの有用性を明らかにするとともに、その設計手法をまとめた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で、提案しているエネルギーハーベスティングセンサは、計測対象の微小のエネルギーを用いて、その計測対象の情報を取得し、電気信号に変換することが可能である。そのため、本センサでは、多重のエネルギー変換を必要とせず、システム全体のエネルギーの効率的な運用ができ、サイバーフィジカルシステムによるエネルギースマートな社会の実現に大きく貢献する技術である。

研究成果の概要（英文）：The possibility of integrating data acquisition sensors with a recently developed energy harvesting system that combines the magnetic phase transition and electromagnetic induction was investigated in this research.

Magneto-thermal properties such as magnetic flux change throughout a magnetic phase transition were experimentally measured to examine characteristics that have strong implications for the proposed temperature sensor. The potential of changing the magnetic moment in a temperature sensor was evaluated. In addition, an appropriate magnetic material was searched and implemented to the proposed sensors.

These investigations demonstrate that the proposed system has great potential for application as an energy harvesting sensor.

研究分野：プロセスシステム工学

キーワード：エネルギーハーベスティング センサ 環境発電 磁気モーメント

### 1. 研究開始当初の背景

我が国が提唱する Society5.0 は、サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させたサイバーフィジカルシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する社会としている。エネルギー分野では、気象や環境情報、各家庭や建築物のエネルギー使用状況などを取り込み、その情報を AI などで解析して、安定かつ最適にエネルギーを供給しつつ省エネを実現したエネルギースマートな社会が描かれている。この社会の実現には、ビッグデータを解析し、最適なエネルギーネットワークを提供するマネジメント技術のみならず、フィジカル空間の情報を取得する計測技術、取得した情報をサイバー空間に効率的に送受信する技術が必要不可欠である。同時に、これらの情報の計測や送受信に必要な電気を安定的に供給するために、振動や電波、光、排熱などといったエネルギーの中で未利用の物からオンサイトで電気を取り出し利用する環境発電技術（エネルギーハーベスティング）の活用が提案されている。

しかしながら、計測機器などの電気需要と環境発電で供給できる電気は一致しない。例えば、一般的な計測器は計測対象の変位が大きいとき、情報を送受信するときと比較的大きな電力が必要となり、変位が小さいときは小電力で十分である。これに対し、環境発電で得られる電気は出力が小さく、環境発電を用いて計測機器を運用するには電気を貯蔵する二次電池を組み込むことが多い。二次電池は電気を化学的に貯蔵することから、エネルギーを変換する際にロスが生じる。これに対し、環境からエネルギーを取り出しつつ、同時に環境情報を取得し、電気信号に変換して送信するエネルギーハーベスティングセンサが構築できれば、環境発電により電気を取り出し、その電気を二次電池にて貯蔵し、必要時に電気に再度変換して計測機器に供給するという多重のエネルギー変換を必要とせず、エネルギーシステム全体の効率的な運用ができ、エネルギースマートな社会の実現が加速すると考える。

### 2. 研究の目的

本研究では、研究代表者が提案した常磁性体と強磁性体の転移に伴う磁気モーメントの変化を用いて電磁誘導により発電する環境発電と計測対象の情報を取得するセンサを統合したエネルギーハーベスティングセンサ構築を目的として、その基礎研究を実施した。このエネルギーハーベスティングセンサを、サイバーフィジカルシステムに導入することで、エネルギースマートな社会の実現に大きく貢献する。

### 3. 研究の方法

図1に示すように、研究代表者は磁性体の温度により生じる磁性体内の磁気モーメントの変化を用いたエネルギーハーベスティングセンサのコンセプトを研究開発以前に設計した。このシステムではキュリー温度より低い場合(a)、磁性体は強磁性体であり、ソレノイドに添付する永久磁石の磁場により自身の磁場を形成する。磁性体を動かすことによりソレノイド周りの磁束が変化し、誘導起電力を生じる。逆にキュリー温度以上(c)では、磁性体は常磁性体となり磁場を形成しない。磁性体の温度により形成する磁場に差異が生じるこの現象を利用して、温度や速度を測定する。

本研究では、キュリー温度付近において、正確な温度を測定するために、1)磁性体の物理・化学の特性の把握とその変位の増幅、2)センサとしてのシステム設計、3)測定対象の範囲拡大を目的とした複数の磁性材料からなる複合材料の作製を行った。

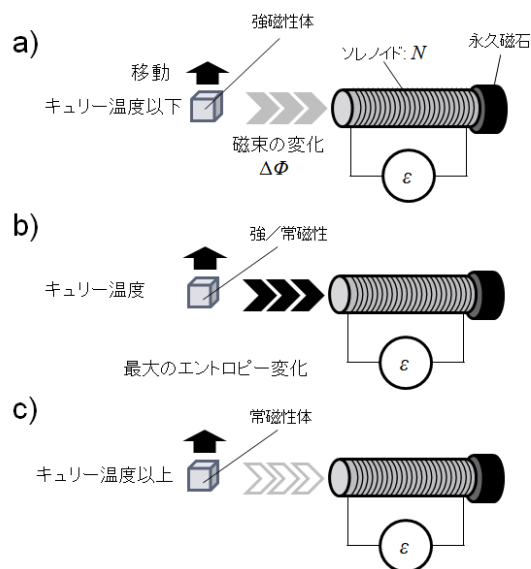


図1. 提案するセンサの概観[1]

#### 1) 磁性体の特性把握と誘導起電力量の増幅

誘導起電力であることからファラデーの電磁誘導の法則より、ソレノイドの巻き数を増やす、モーターの回転速度をあげるなどの変化を加えることで、誘導起電力を大きくすることができるが分かっている。本研究では、それ以外の磁性体の物理・化学的な特性の把握として、キュリー温度付近での磁性体の磁化率の温度による変化を定量的に分析した。具体的には、磁性体表面から一定距離離れた点の磁束密度を、キュリー温度付近の各温度に温調器で調整して、ガウスメータにて測定し、磁束密度と温度の関係を求めた。同時に、磁性体の形状による影響、加温と冷却した場合の熱量の差を測定することで、ヒステリシスの影響を調べた。

## 2) 非接触エネルギーハーベスティングセンサの構築

### ● 温度・速度と誘導起電力の変位の測定

誘導起電力の変位を逐次的に電圧計にて測定し、温度と誘導起電力の大きさの関係を統計的に解析した。また、伝熱によりガドリニウムの温度変化を生み出し、ソレノイドに生じる誘導起電力の測定を行った。

### ● エネルギーハーベスティングセンサの試設計

温度、速度の各センサに適した装置の試設計を行い、得られたデータと理論式からモデルを作成した。設計した実験装置を用いて、計測対象物の温度や速度によって、ソレノイドに生じる誘導起電力に差異があることを実験により確認した。

## 3) 取得データ範囲の拡張に資する複合材料

文献調査から提案するセンサに適した磁性材料を選定し、実際にその磁性体を調製して、その磁性体の特性の把握を行った。同時に、調製した磁性体を2)で設計した実験装置に取り付け、誘導起電力の発生を確認した。

## 4. 研究成果

### 1) 磁性体の特性把握と誘導起電力量の増幅

図2にキュリー温度付近での磁性体の磁化率の温度による変化を示す。ここでは磁性体としてガドリニウムを用いている(キュリー温度:19℃)。強磁性体となっているキュリー温度より低い温度から常磁性体となるキュリー温度以上までに加熱した際の磁化の変化(赤色)と逆に冷却した際の磁化の変化(青色)を示している。

強磁性体、遷移状態(相変化)、常磁性体の3領域に分かれることが、各領域での磁化の傾きよりみてとれる。遷移状態においては、強磁性体や常磁性体のときの傾きに比べ、約2倍の変化が観測された。そのため、キュリー温度付近の遷移状態の物質を用いることが増幅につながる。

また、図2から加熱時と冷却時では、差が生じていることを確認できる。これはヒステリシスの影響である[2]。

使用するガドリニウムの形状、方向や大きさなどを変更して同様の実験を行ったところ、計測域での大きさが大きい方が磁化の変化が大きいことを確認した。

また、外部磁場が大きいほど、変化が大きく、温度に対して広く変化が大きくなることを確認された。つまり、大きな外部磁場を与えることで、誘導起電力の増幅と温度に対して広く分布し測定範囲が広がる可能性が示唆された。

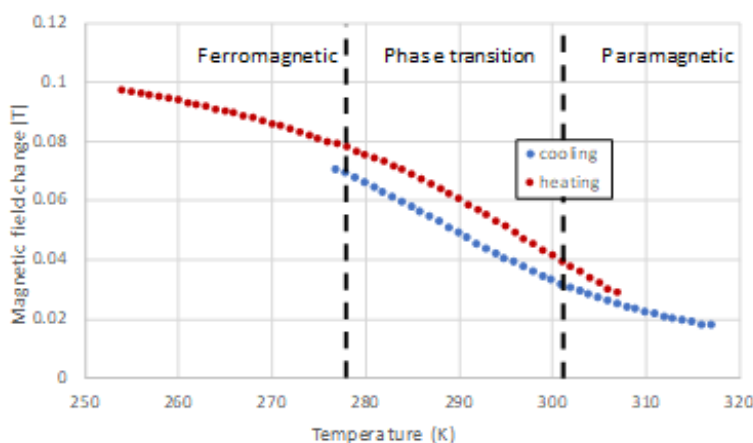


図2. 温度と磁性体が形成する磁化の関係 (1.0 Tの外部磁場下)

## 2) 非接触エネルギーハーベスティングセンサの構築

図3で示す実験装置をベースに、アームの長さやソレノイドの巻き数を変更するなどして非接触エネルギーハーベスティングセンサの構築を行った。

### ● 温度・速度と誘導起電力の変位の測定

開始当初は発生する誘導起電力とノイズの差がほとんどなく、変位の計測が非常に困難であったが、モーターにサーボ機構を導入して、モーターの回転速度の安定化を図るなどにより、誘導起電力の計測が可能な状態となった。その結果を図4に示す。移動平均を使って、ノイズの影響を小さくしているが、誘導起電力を十分に観測することができる。誘導起電力の変位を逐次的に電圧計にて測定した。また、測定対象となる温度を変更して、測定実験を行った。

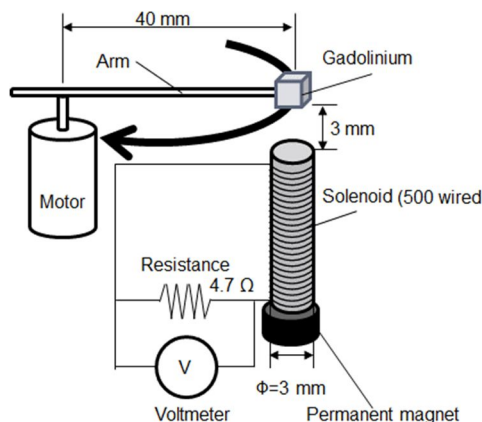


図3. 実験装置[1]

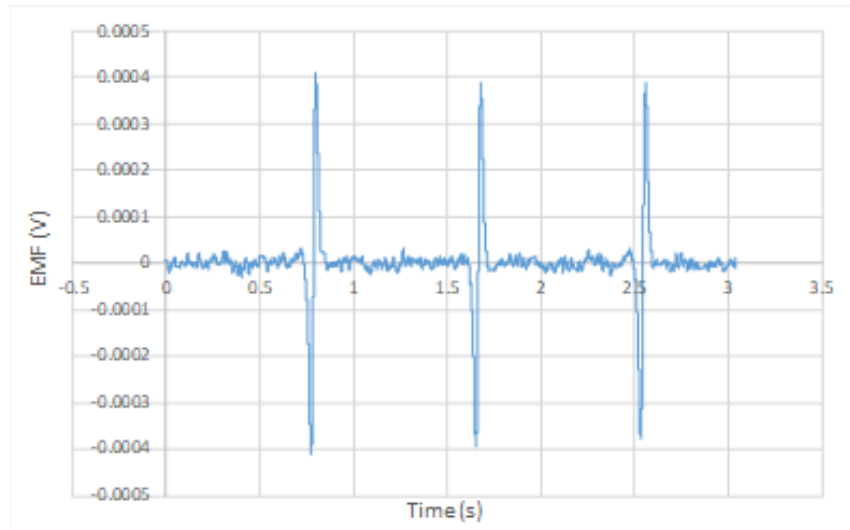


図4 . 誘導起電力 (10ms の移動平均)[2]

● エネルギーハーベスティングセンサの試設計

図3で示す実験装置により、等温下において、温度および速度の測定ができることが確認したが、等磁場下においても変位を測定することで、温度測定用のセンサの構築が可能となることを確認した。その模式図を図5に示す。等磁場下で測定する場合は変位を見る必要があることから、参照温度が必要となる。また、変位が十分に大きい時に精度よく測定できる。これに対し、等温下では、キュリー温度が参照温度として働く。しかしながら、等速度運動となるように外部からのアシストが必要となることが分かった。

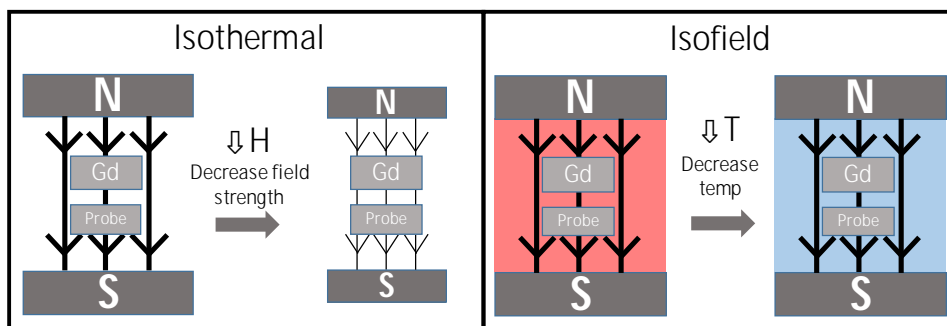


図5 . 等温下および等磁場下での温度センサの概観[2]

3) 取得データ範囲の拡張に資する複合材料

常温付近で実験することを考え、提案するセンサに適した磁性体として、マンガン、鉄、リン、ケイ素からなる複合材料を選定した。組成比を変更することで、キュリー温度の調整も可能であると先行文献に報告がなされている[3]。この複合材料の特性とセンサのプロープとしてのポテンシャルを把握するために、実際に、代表的な組成比となるように複合材料を調製し、分析を行った。また、外部磁場の中において、調製した磁性体が各温度において形成する磁場をガウスメータにて測定した。調製した磁性体は予想していたキュリー温度よりも低いキュリー温度を有する物質となったが、温度や速度の変化により磁場が変化することを確認した。

また、調製した複合材料を図3の実験装置のアームの先に取り付け、誘導起電力を測定した。

各検討の結果から、温度や速度を測定することが可能な新規のエネルギーハーベスティングセンサを構築できた。また、その設計手法をまとめた。

<参考文献>

[1] Y. Kansha, M. Ishizuka: Design of energy harvesting wireless sensors using magnetic phase transition, Energy, Vol. 180 (2019) pp. 1001–1007  
 [2] H. Kiyomoto, Y. Sakai, Y. Kansha: Evaluation of isothermal and isofield designs of a temperature sensor using a magnetic phase transition, Therm. Sci. Eng. Prog, (2024) Vol. 50 102597  
 [3] D.T. Cam Thanh, E. Brück, N.T. Trung, J.C.P. Klaasse, K.H.J. Buschow, Z.Q. Ou, O. Tegus, L. Caron, Structure, magnetism, and magnetocaloric properties of  $MnFeP_{1-x}Si_x$  compounds, J. Appl. Phys. Vol. 103 (2008) 07B318

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Hikaru Kiyomoto, Yuka Sakai, Yuki Sato, Yasuki Kansha	4. 巻 103
2. 論文標題 Application of Magnetic Phase Transition for a Novel Wireless Sensor Device for Body Temperature	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Chemical Engineering Transactions	6. 最初と最後の頁 193 ~ 198
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3303/CET23103033	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -
1. 著者名 Kiyomoto Hikaru, Sakai Yuka, Kansha Yasuki	4. 巻 50
2. 論文標題 Evaluation of isothermal and isofield designs of a temperature sensor using magnetic phase transition	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Thermal Science and Engineering Progress	6. 最初と最後の頁 102597
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tsep.2024.102597	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -
1. 著者名 甘蔗 寂樹	4. 巻 102
2. 論文標題 エクセルギーを基盤とした低炭素かつエネルギースマートな社会の実現	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本エネルギー学会機関誌えねるみくす	6. 最初と最後の頁 287 ~ 292
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20550/jieenermix.102.3_287	査読の有無 無
オープンアクセス 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 -
1. 著者名 Yasuki Kansha, Masanori Ishizuka	4. 巻 49
2. 論文標題 Energy Harvesting Wireless Sensors Using Magnetic Phase Transition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Computer Aided Chemical Engineering	6. 最初と最後の頁 2059 ~ 2064
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/B978-0-323-85159-6.50343-2	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 Hikaru Kyomoto, Yuka Sakai, Yuki Sato, Yasuki Kansha
2. 発表標題 Application of Magnetic Phase Transition in Energy Harvesting Wireless Sensors for Body Temperature
3. 学会等名 26th Conference on Process Integration for Energy Saving and Pollution Reduction (PRES'23) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hikaru Kyomoto, Yuka Sakai, Yasuki Kansha
2. 発表標題 Application of Magnetic Phase Transition in Energy Harvesting Wireless Temperature Sensors
3. 学会等名 2023 AIChE Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清本 光、酒井 裕香、佐藤 雄己、甘蔗 寂樹
2. 発表標題 磁気モーメントの変化によるエネルギーハーベスティング体温計デバイスの構築
3. 学会等名 第32回日本エネルギー学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yasuki Kansha, Masanori Ishizuka
2. 発表標題 Energy Harvesting Wireless Sensors Using Magnetic Phase Transition
3. 学会等名 The 14th International Symposium on Process Systems Engineering (PSE2021+) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasuki Kansha, Hikaru Kiyotomo, Yuka Sakai
2. 発表標題 Design of innovative energy harvesting wireless sensors based on magnetic phase transition
3. 学会等名 26th International Congress on Chemical and Process Engineering (CHISA2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasuki Kansha, Hikaru Kiyotomo, Yuki Sato, Yuka Sakai
2. 発表標題 Design of New Energy Harvesting Technologies for Cyber Physical Systems
3. 学会等名 The Sixth International Symposium on Innovative Materials and Processes in Energy Systems (IMPRES 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hikaru Kiyotomo, Yuka Sakai, Yuki Sato, Yasuki Kansha
2. 発表標題 Possible Application of Magnetic Phase Transition in Energy Harvesting Wireless Sensors for Body Temperature
3. 学会等名 The Sixth International Symposium on Innovative Materials and Processes in Energy Systems (IMPRES 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasuki Kansha, Hikaru Kiyotomo, Yuka Sakai, Yuki Sato
2. 発表標題 Possibility of Energy Harvesting Wireless Sensors Using Magnetic Phase Transition
3. 学会等名 2022 AIChE Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasuki Kansha
2. 発表標題 Chemical and Environmental Engineering Endeavor towards Green Transformations
3. 学会等名 1st International Conference on Sustainable Chemical, Energy and Environmental Engineering (SCE3) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yasuki Kansha, Hikaru Kiyotomo, Yuka Sakai
2. 発表標題 Design of New Energy Harvesting Technologies for Cyber-Physical Systems
3. 学会等名 International Chemical Engineering Symposia 2023, 化学工学会第88年会併設 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 甘蔗寂樹
2. 発表標題 Energy harvesting form sub-ambient temperature exhausted heat using magnetic phase transition
3. 学会等名 The 10th China-Japan Symposium on Chemical Engineering “Low-carbon chemical engineering: sciences and technologies” (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<a href="http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/ykansha/index.html">http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/ykansha/index.html</a>
---



6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------