

# 永久磁石エラストマー ～やわらかい永久磁石～ の開発とエネルギーハーベスティングへの応用

産学連携クリーンテック技術展  
2021年2月25日（木）～26日（金）

名古屋工業大学 電気・機械工学専攻  
准教授 岩本 悠宏

[iwamoto.yuhiro@nitech.ac.jp](mailto:iwamoto.yuhiro@nitech.ac.jp)



Nagoya Institute of Technology

# エネルギーハーベスティングとは？



## エネルギーハーベスティング：

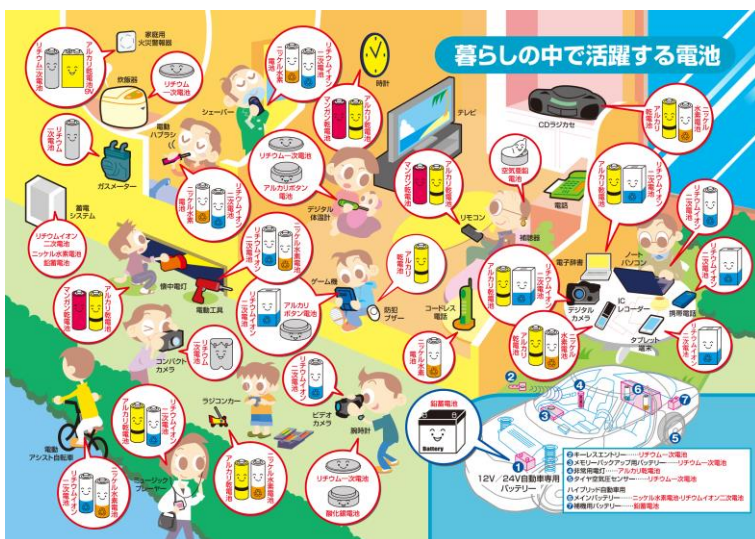
- ▶ 環境中に存在する未利用エネルギーを「**収穫**」（**ハーベスト**）して、電気エネルギーに変換する技術
- ▶ 小規模な発電技術（マイクロワットからワット程度）

**エネルギーの下限の目安** = 現在の技術で活用可能な電気エネルギーの下限

例) 腕時計

マイクロワット？

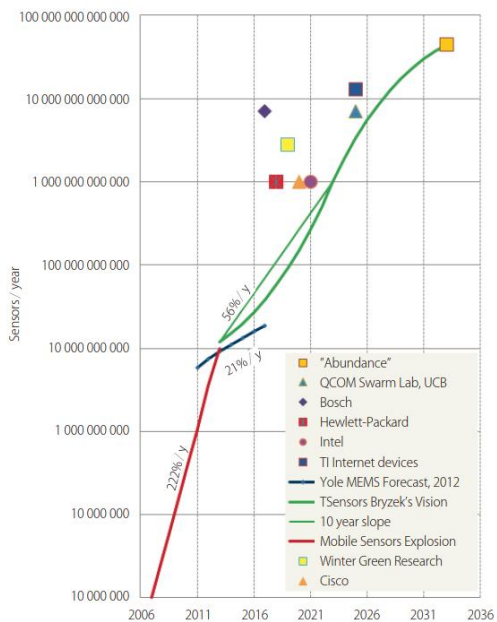
時刻のカウントと針の駆動に必要な電力 = 約 $0.5\mu\text{W}$



電池の様々な用途

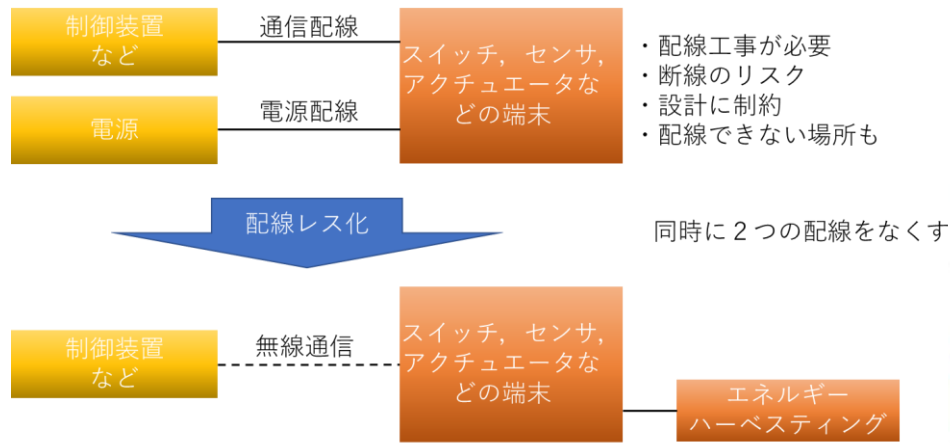
(出典：<http://www.baj.or.jp/knowledge/stage.html>)

# エネルギーハーベスティングの用途



トリリオン・センサのビジョン  
によるセンサ数の推移

(出典：J. Bryzek, TSensors Summit Munich, 2014)



- ・配線工事が必要
- ・断線のリスク
- ・設計に制約
- ・配線できない場所も

同時に2つの配線をなくす

## 1 センサシステム技術

インフラモニタリングに最適なセンサシステム開発  
 ・手のひらサイズ  
 ・10年間ノーメンテナンス  
 ・無電源、無線通信



## 2 画像を活用したイメージング技術



画像技術を活用して、微小変形やひび割れの検出

老朽化した社会インフラ  
 ロボットにより橋やダム の点検を効率化、土砂・火山災害の調査

## 3 ロボットによる点検

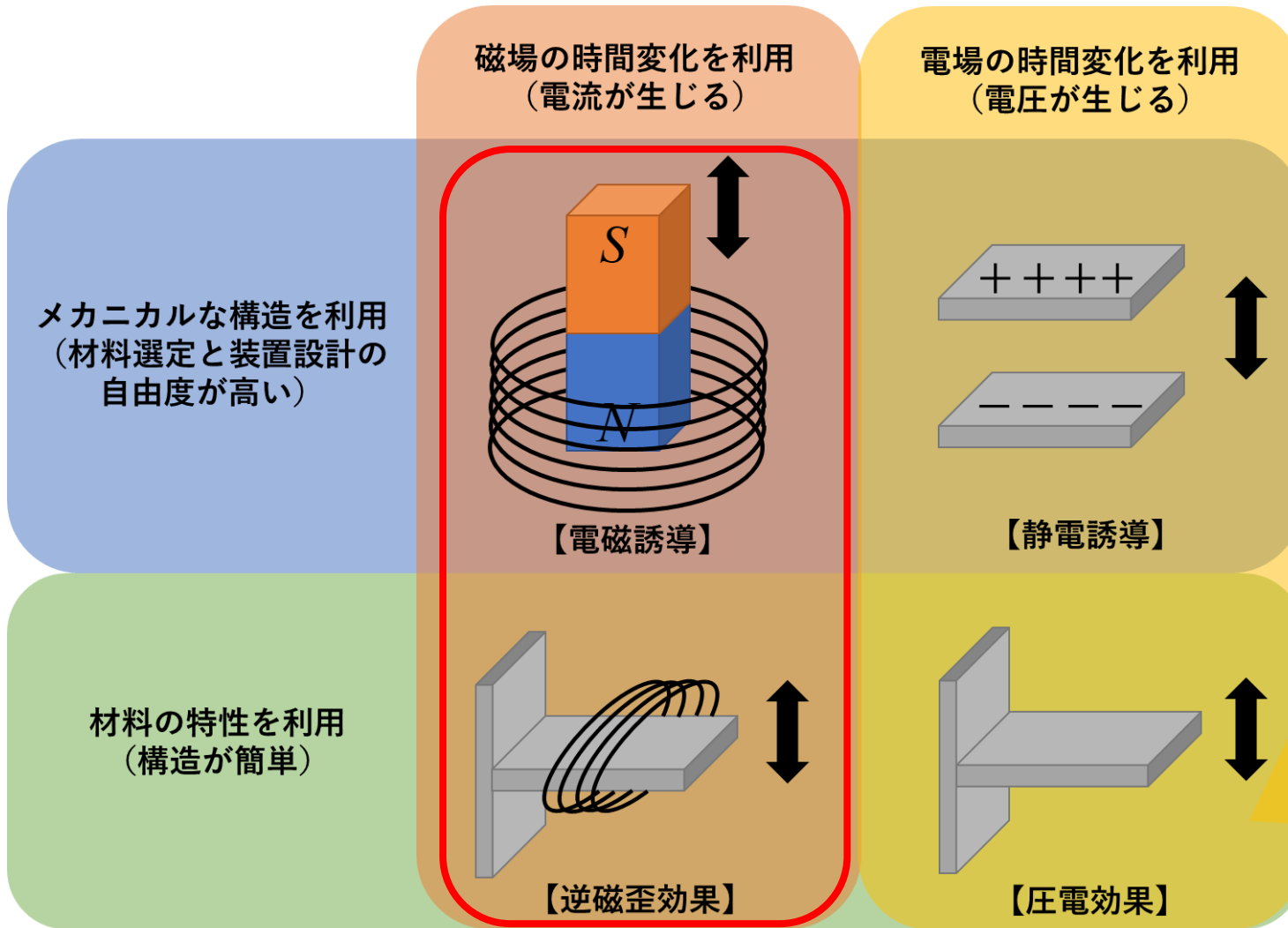
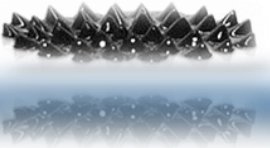


インフラ維持管理・更新等の社会課題対応  
 システム開発プロジェクト

(出典：https://www.nedo.go.jp/content/100887966.pdf)

エネルギーハーベスティングは、(1) 電池を代替・補完する  
 (2) 配線を代替する  
 (3) 新規市場を開拓する

# 発電原理～磁場・電場の利用～



出典：<http://taiyoukou001.web.fc2.com/03/008.html>



出典：<https://ja-jp.facebook.com/energy.harvesting/>  
株式会社音力発電

力学的エネルギーを電気エネルギーに変換する原理

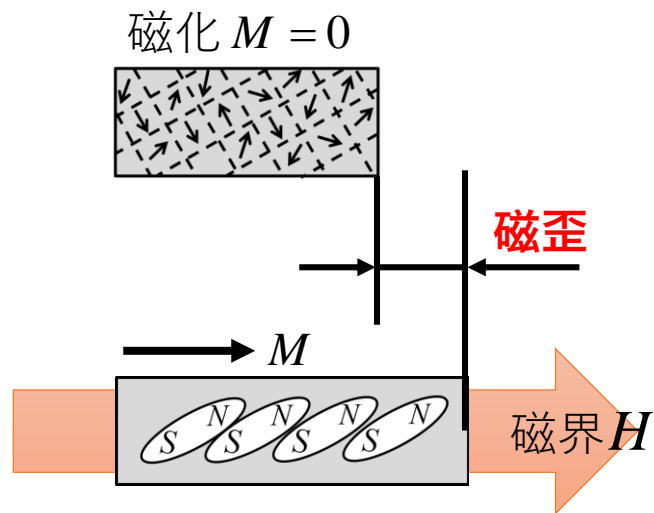


# 磁歪材料



## 磁歪効果

磁化すると形状が変化する（伸びる）効果



19世紀にジェームズ・プレスコット・ジュール（イギリス）によって発見（鉄、コバルト、ニッケルなど）

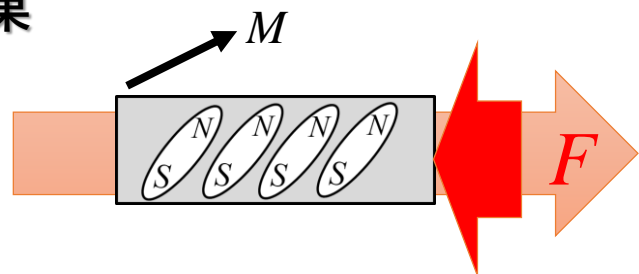
伸び量：鉄 = 6ppm ( $6 \times 10^{-6}$ ) 程度

アメリカ海軍研究所（NSWC）で鉄系磁歪材料の開発に成功

伸び量：鉄-ガリウム合金 =  $\sim 300$ ppm



## 逆磁歪効果



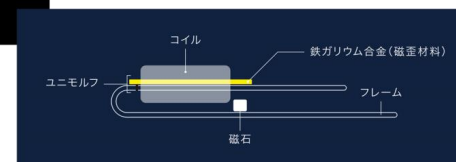
## 磁束密度

$$B = M + \mu_0 H$$

磁束の時間変化 → 発電



V-generator  
金沢大学 上野教授





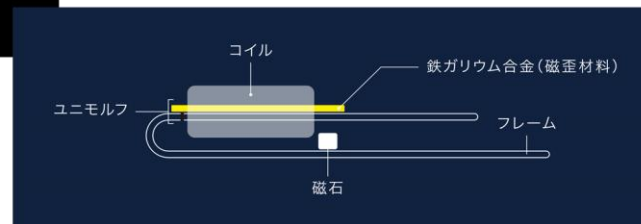
出典：<http://taiyoukou001.web.fc2.com/03/008.html>



出典：<https://ja-jp.facebook.com/energy.harvesting/>  
株式会社音力発電



V-generator  
金沢大学上野教授



従来技術：

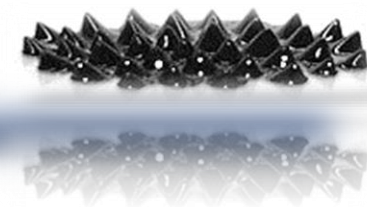
- 微小変位 & 高振動数 (数十Hz～)
- 共振現象などを利用

様々な環境に適応・特化した  
エネルギーハーベスティング技術の開発が必要

本技術：

未開拓領域  
環境振動発電  
「大変位 & 超低振動数 (～10Hz)」

# 磁性エラストマー



シリコンゲル

粘弾性

+



強磁性微粒子

磁性

=

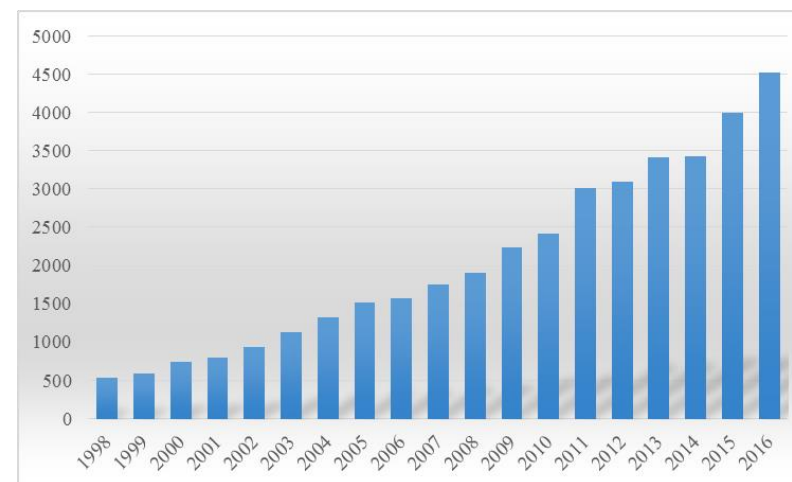


磁性エラストマー

磁気粘弾性

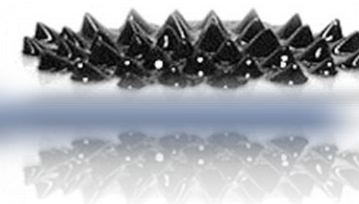
## 磁性エラストマーの特徴

- **MR効果**  
磁場印加により硬さや粘弾性が変化
- **磁歪効果**  
磁場印加により変形
- **逆磁歪効果**  
変形により磁性が変化



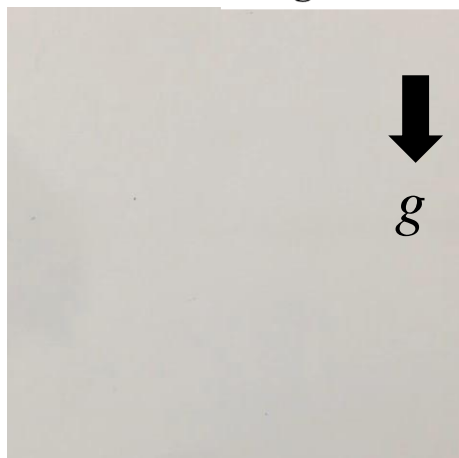
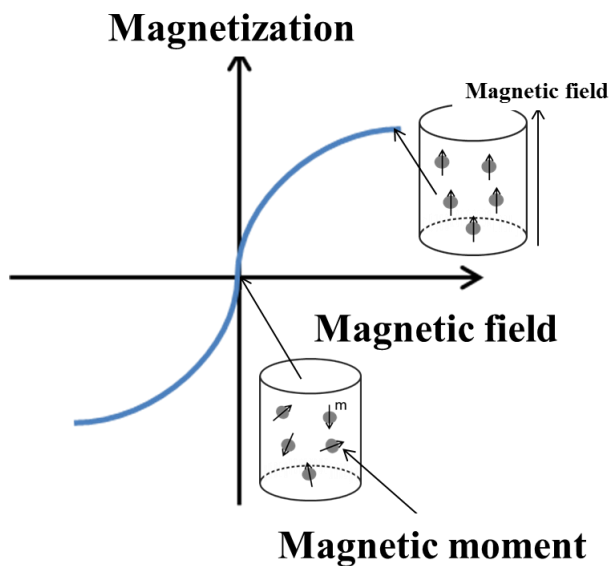
“Magnetic” と “elastomer” のキーワードで  
ヒットする論文数 (Google Scholar)

# 従来技術との比較



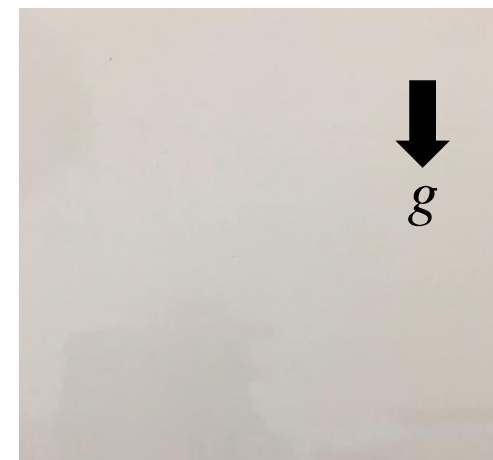
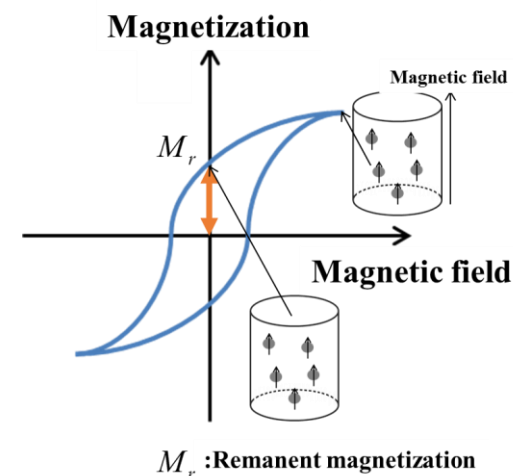
## 従来の磁性エラストマー

- 磁化するために外部磁場を印加する必要がある。



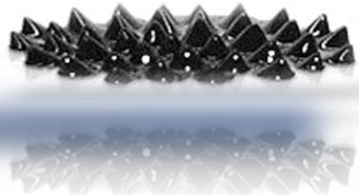
## 永久磁石エラストマー

- 磁化するための外部磁場が不必要 (残留磁化, 保磁力を有する) = 永久磁石の性質
- 3次元的に大伸縮する。



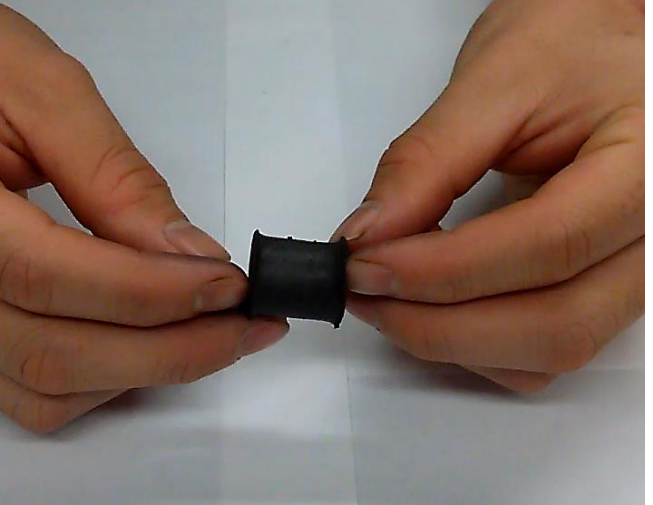
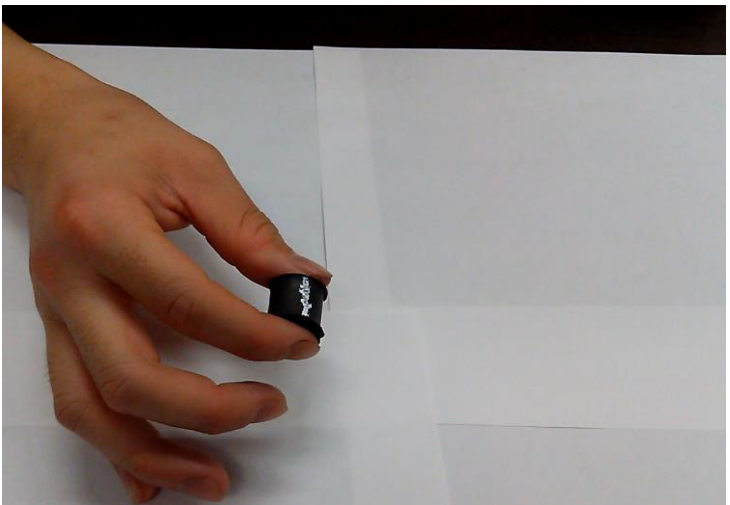
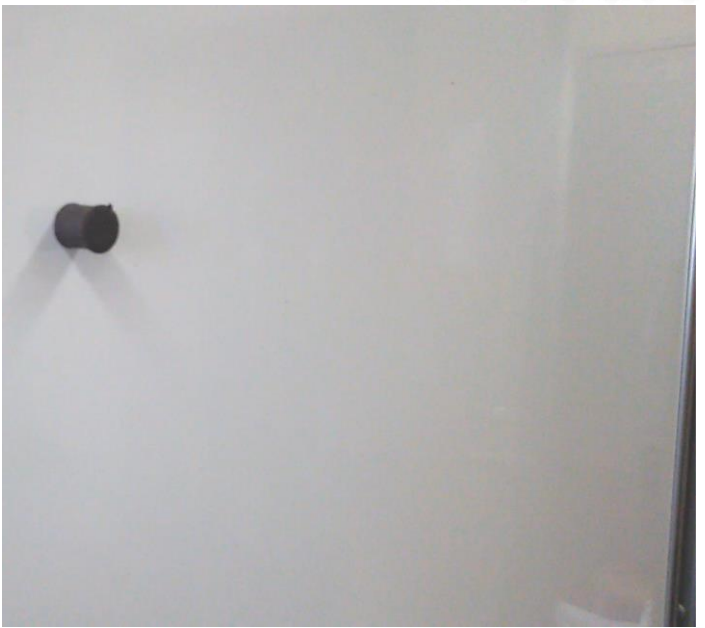
岩本他, 特開2016-152337  
岩本他, 特開2019-022435



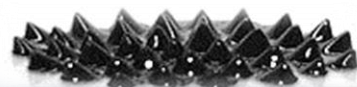


## 永久磁石エラストマー

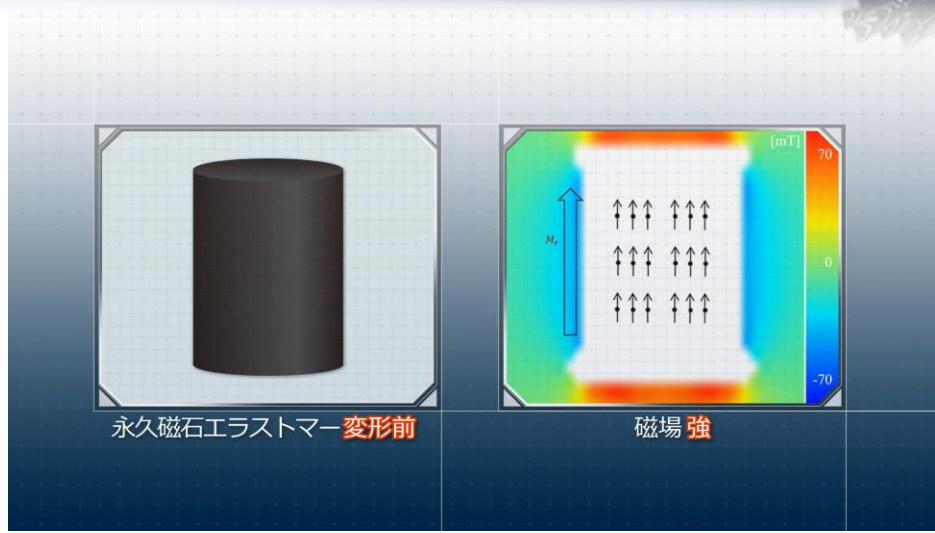
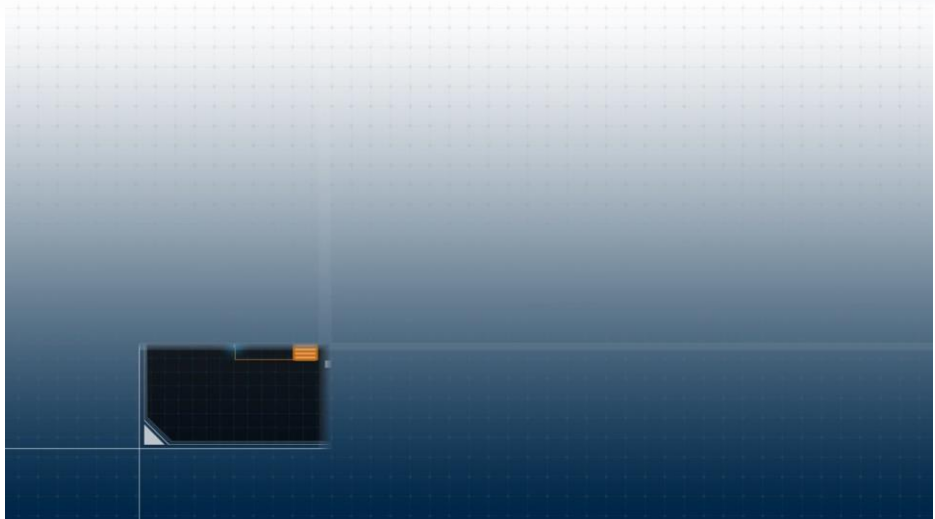
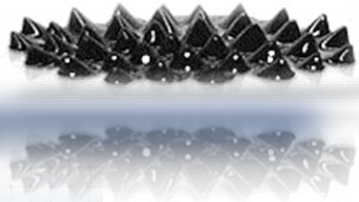
永久磁石 × やわらかい  
(粘弾性)



# 期待される応用例



# 期待される応用例（電池フリーワイヤレスセンサーなど）





# 永久磁石エラストマーの作製方法



## 作製方法

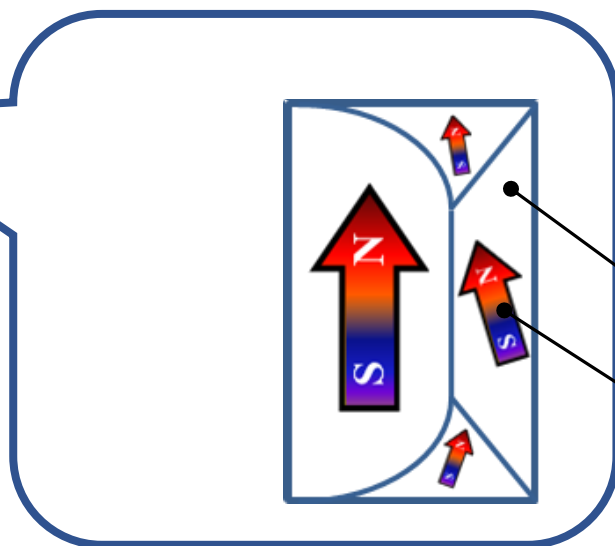
シリコンゲルとネオジム微粒子を混合



任意形状（円柱，球形，薄膜など）に加熱成形

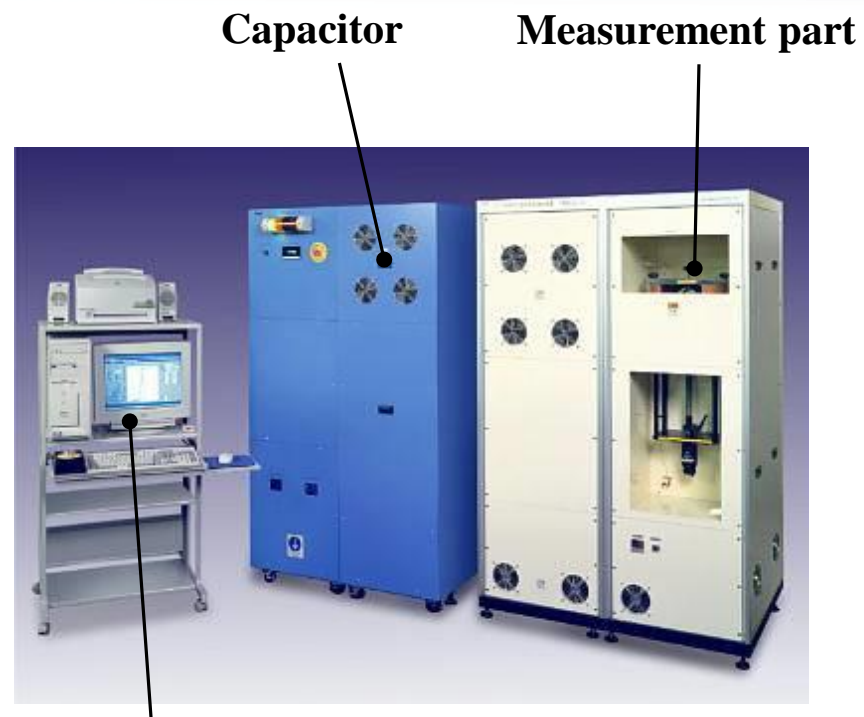


パルス一様強磁場（ $\sim 8\text{ T}$ ）により着磁



磁区

磁気モーメント



Capacitor

Measurement part

Controller

Pulsed high field magnetometer (TOEI)

Courtesy of KRI Inc.





## ● シリコンゲル

2成分室温硬化シリコンポットティングゲルTSE3062

混合割合 主剤：硬化剤 = 1：1配合

硬化条件：70°C、30分

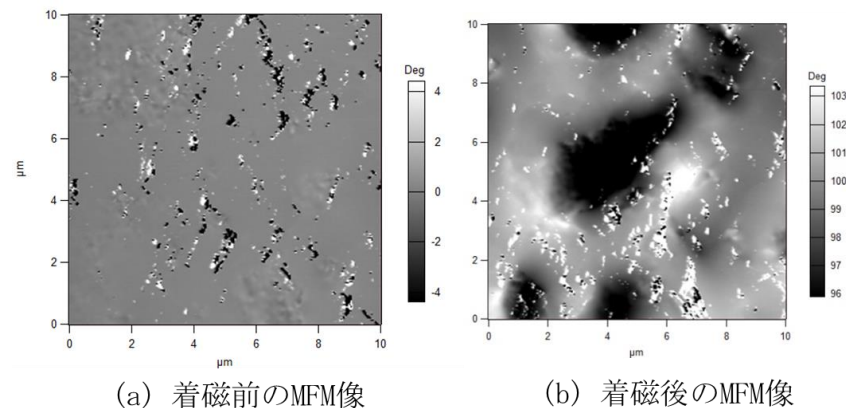
## ● ネオジム微粒子 (マグネクエンチ製)

	MQFP14-12-20000-089
平均粒子径 [ $\mu\text{m}$ ]	5
防錆処理	あり
表面処理	あり

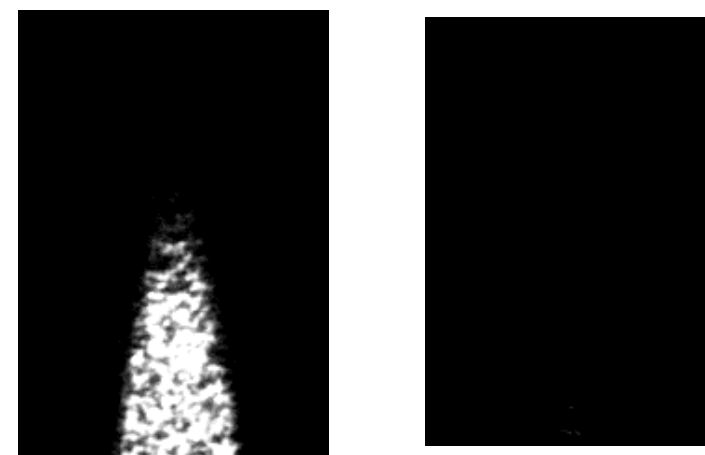


10 vol.%   20 vol.%   30 vol.%

着磁@8T後の供試体  
(H=18mm, D=18mm)



MFMによる磁区の可視化



(a) 着磁前

(b) 着磁後

3D X-ray CTSによる内部構造の可視化

# B-H曲線 (減磁曲線)

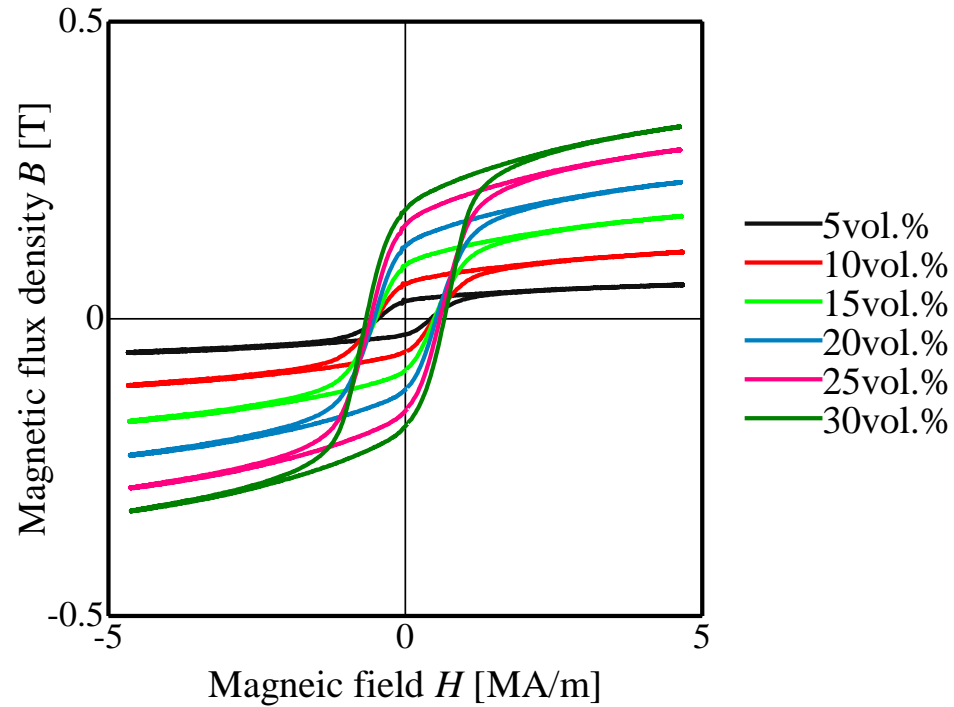
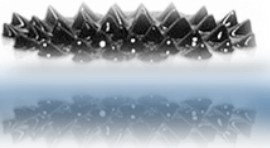


Fig. B-H曲線

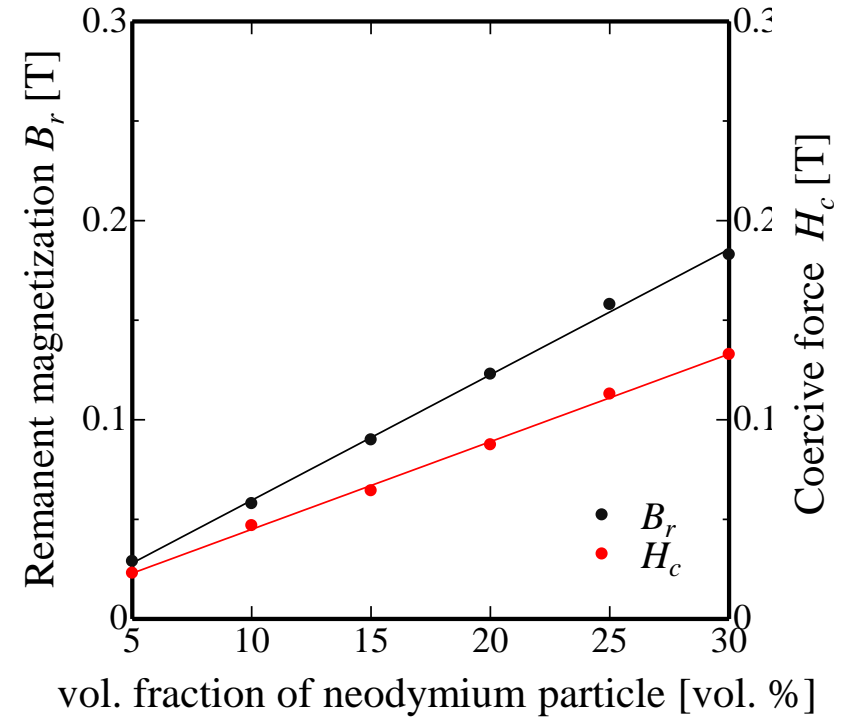


Fig. 残留磁化 $B_r$ と保磁力 $H_c$

- 高い残留磁化と保磁力を有する (永久磁石の性質)
- ネオジム粒子の体積割合が増加すると、残留磁化と保磁力が大きくなる

# 表面磁束密度分布

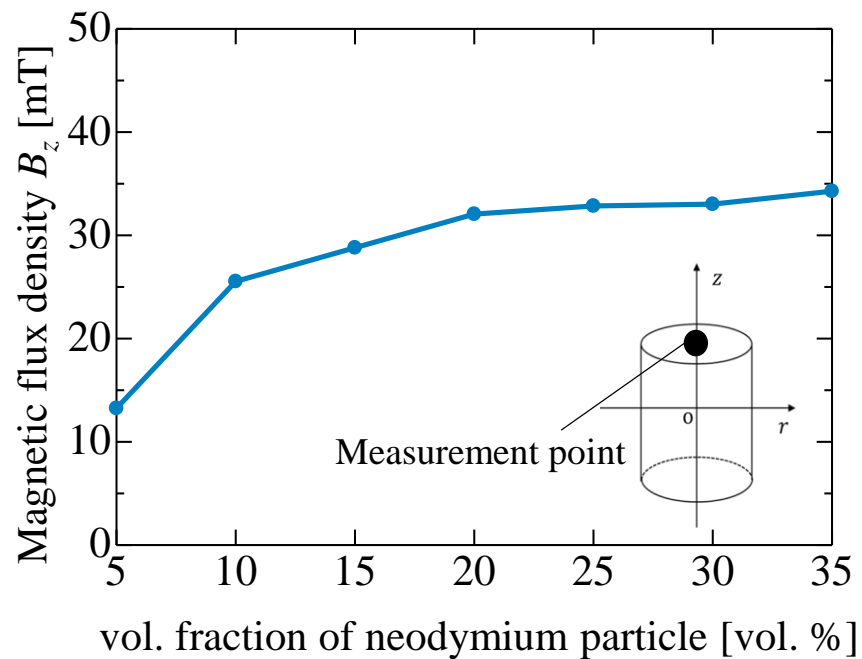


Fig. 表面磁場強度

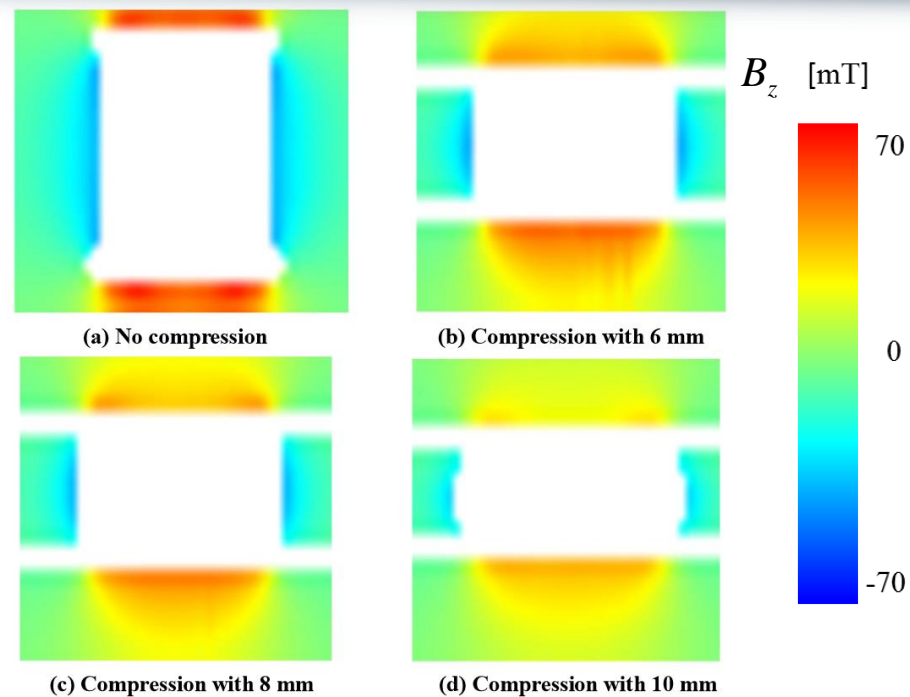


Fig. 変形に伴う表面磁束分布の変化 (逆磁歪効果) @80 wt.%

- ネオジム粒子の含有割合が増加すると表面磁束が大きくなる
- 変形に伴い表面磁束が著しく変化する (逆磁歪効果)
- 環境振動発電への応用が可能

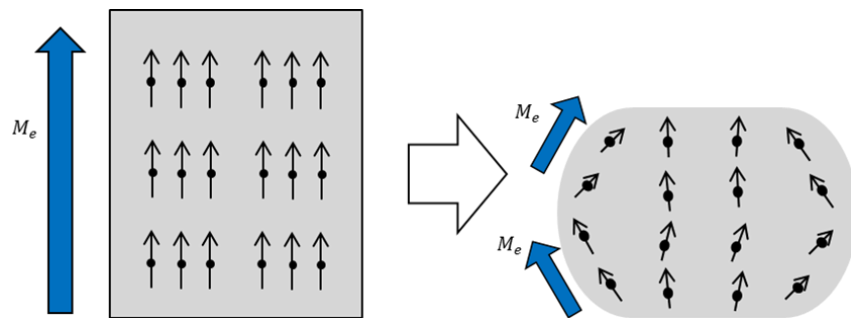
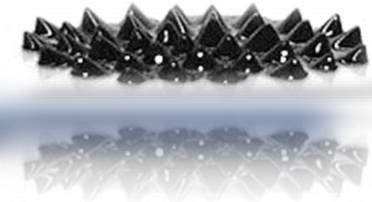
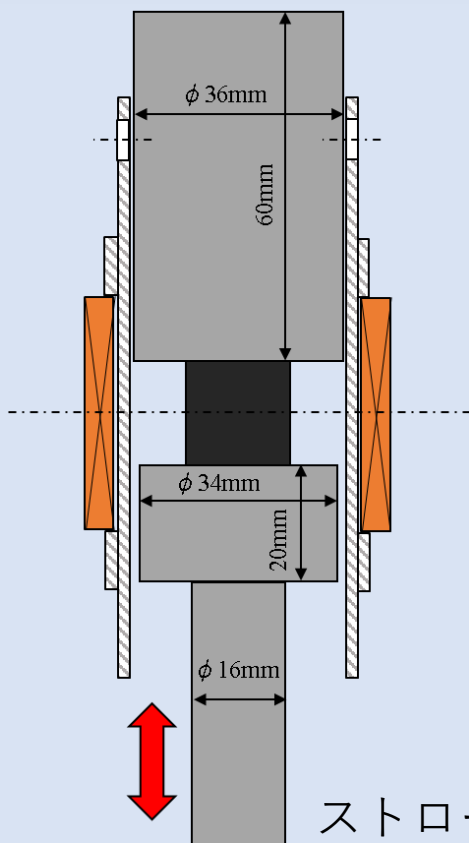


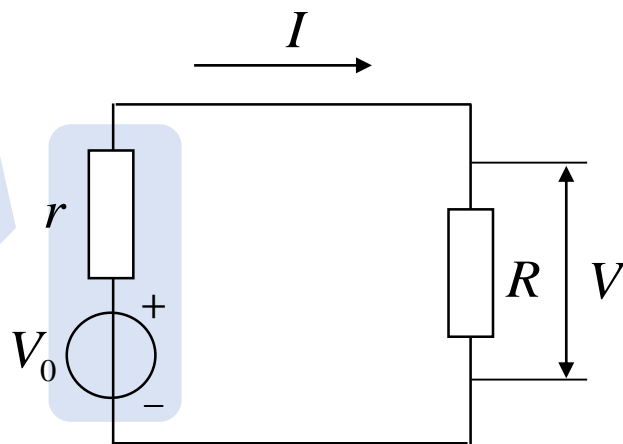
Fig. 変形によるモーメントの変化



## 発電部



ストローク：10 mm



$r$  : 内部抵抗 [ $\Omega$ ]

$R$  : 外部抵抗 [ $\Omega$ ]

$V_0$  : 誘導起電圧 [V]

$$I = \frac{V_0}{R + r} \text{ [A]} \quad , \quad V = \frac{R}{R + r} V_0 \text{ [V]}$$

$$\text{発電量 : } P = RI^2 = \frac{R}{(R+r)^2} V_0^2 \text{ [W]}$$

## 検出コイルの仕様

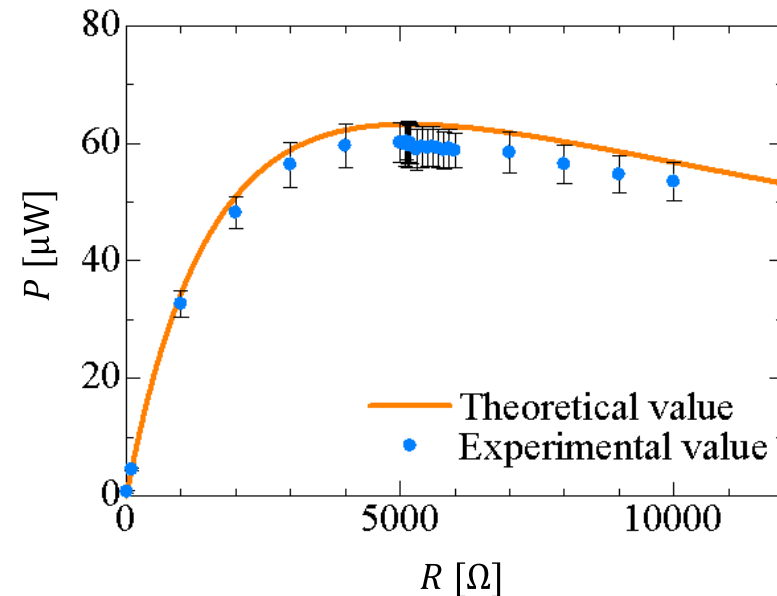
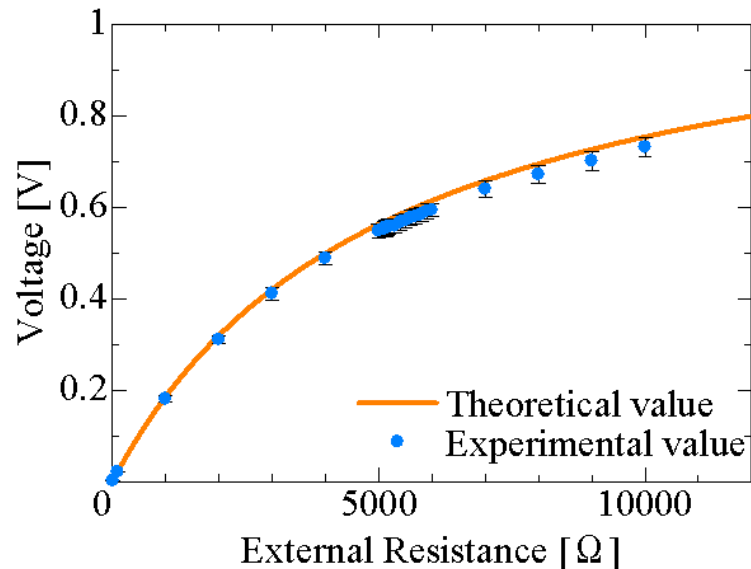
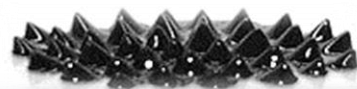
Wire diameter [mm]	0.1
width [mm]	40
Inner diameter [mm]	40
Number of turns	15000
Resistance [ $\Omega$ ]	5150



## 永久磁石エラストマーの仕様

分散媒	Silicone potting gel (TSE3062)
分散質	Neodymium particles (MQFP14-12-20000-089)
粒子体積濃度 [vol.%(wt.%)]	20 (66.2)
高さ [mm]	18
直径 [mm]	18





発電量と外部負荷抵抗値との関係  
@振動数10Hz

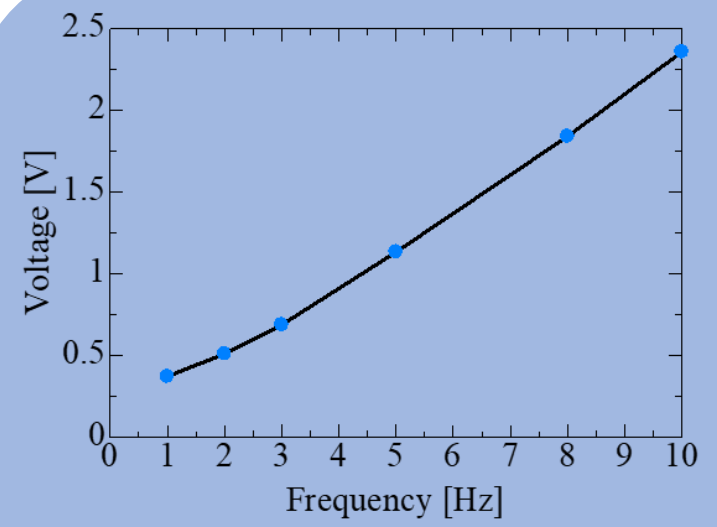
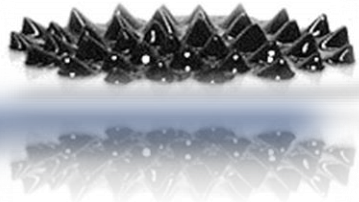
理論値 :  $P = \frac{R}{(R + r)^2} V_0^2$   
( $r = 5150$  [Ω])

実験値 :  $P = \frac{V^2}{R}$

内部抵抗**5150 Ω**の検出コイルに対し、  
外部抵抗**5120 Ω**の時、最大値60.3 μW



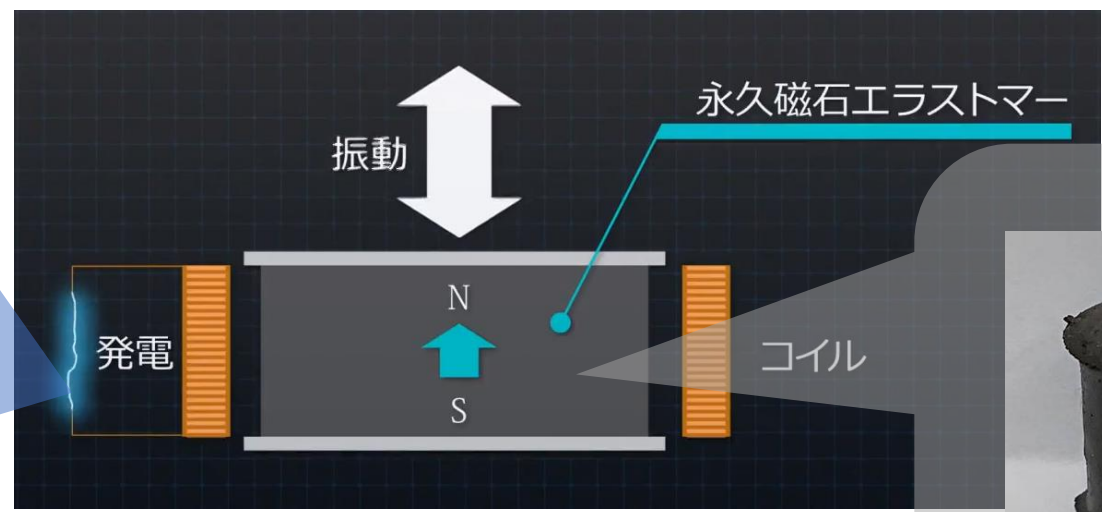
インピーダンス整合の理論が確認



振幅5mm入力における起電圧



LED点灯



## 電池フリーセンサーを実証

- 小さい永久磁石エラストマー（直径18mm, 高さ18mm）において、低振動数～10Hzかつ大振幅～10mmで、約2.3V（＝乾電池約1.5個直列相当の電圧）の発電に成功！！
- LEDの点灯に成功！！