

Q: 電磁石で浮いたカエルには健康的被害はあるのでしょうか。

A: まず⑫のネオジム磁石の表面の磁場の強さを測ってみます。このレベルでは健康に害はありません。強い磁場の例としてはMRIがあります。私もやったことが何度かありますが、MRIの磁場強度は 1.5T とか 3 T で、ネオジム磁石の表面の数倍ですが、健康に害はありません。MRIの面白い動画があるので見てみましょう。カエルの実験では、おそらくこの10倍くらいだと思いますが、カエルには害はなかったと思います。

Q: ネオジム磁石に砂鉄などがくっついてしまって、それをはがしたいときはどしたらいいんですか。

A: ガムテープやセロテープ等でとれると思います。

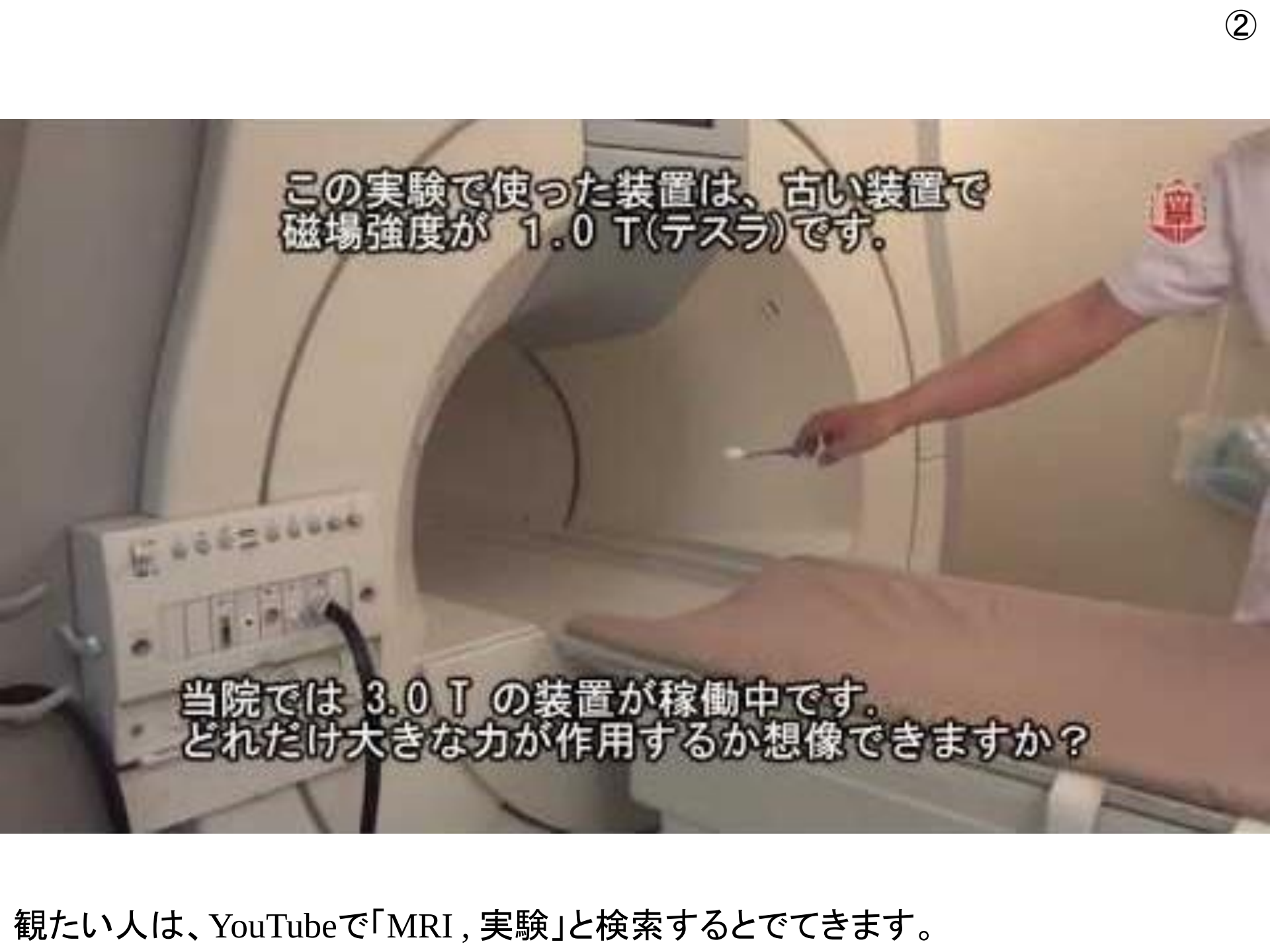
Q: レポートの提出はいつですか？

A: 以前も言いましたが、1月16日(木)です。時刻は授業開始前まで。授業終了後は減点対象になります。早く出したい人は、私の居室前にポストがありますので、そこに出して下さい。

Q: 寒かった。

A: しゃべっていると暑いので、気が付きませんでした。次回からは気をつけます。

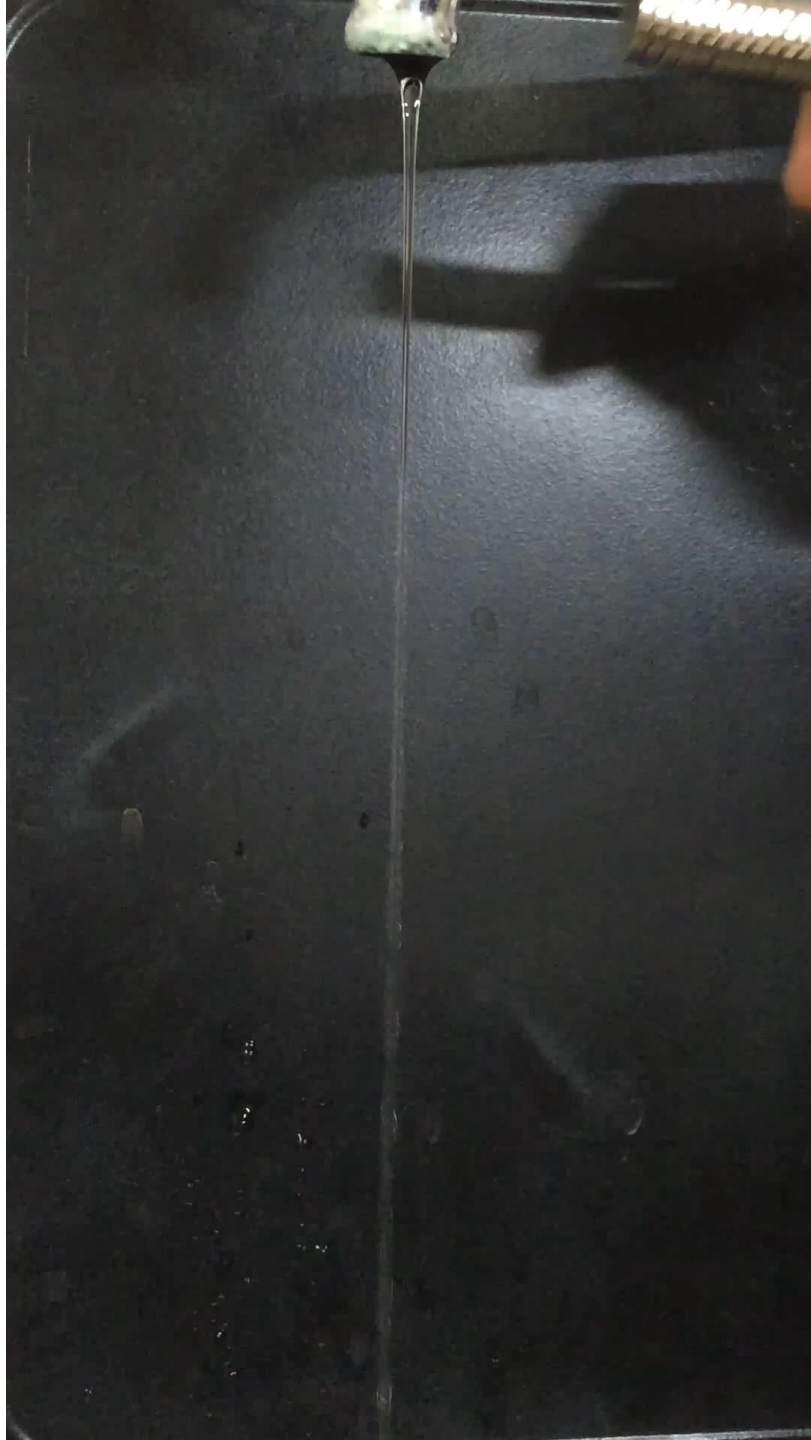
他にもあったのですが、次回以降にします。(金曜1限までは時間があまりない)



この実験で使った装置は、古い装置で
磁場強度が 1.0 T(テスラ)です。

当院では 3.0 T の装置が稼働中です。
どれだけ大きな力が作用するか想像できますか？

観たい人は、YouTubeで「MRI, 実験」と検索するとでてきます。



静電気等で帯電した物体を
近づけると、それが正でも負でも
引力が働き、水流が寄ってくる。

この動画と逆



静電気が原因でない。

反磁性体

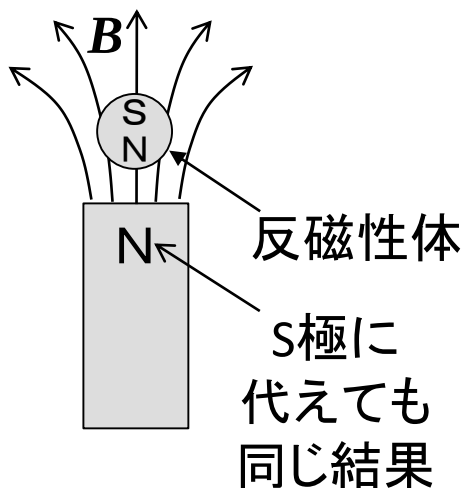
反磁性体は、磁極を近づけると遠ざかろうとする。

動画：水道の蛇口から流れ落ちる水流にネオジム磁石を近づけてみる。

実験・測定：最強の永久磁石であるネオジム磁石の表面の磁場の強さをテスラメーターで測定

0.5 T

地磁気の
約1万倍



反磁性体に働く力はいちへん弱いですが、
20 T という強力な電磁石を用いると、
反磁性体を重力に逆らって浮かすこともできる。

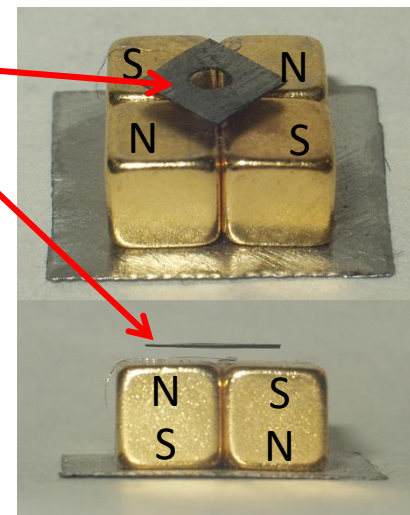
動画：動植物は水を多く含むので反磁性体である。
イチゴやカエルを左図のようにして浮かすことができる。

ネオジム磁石でもシャープペンの芯や、**熱分解カーボン**など、一部の反磁性体は浮かすことができる。

市松模様のネオジム磁石板(上から見て)→

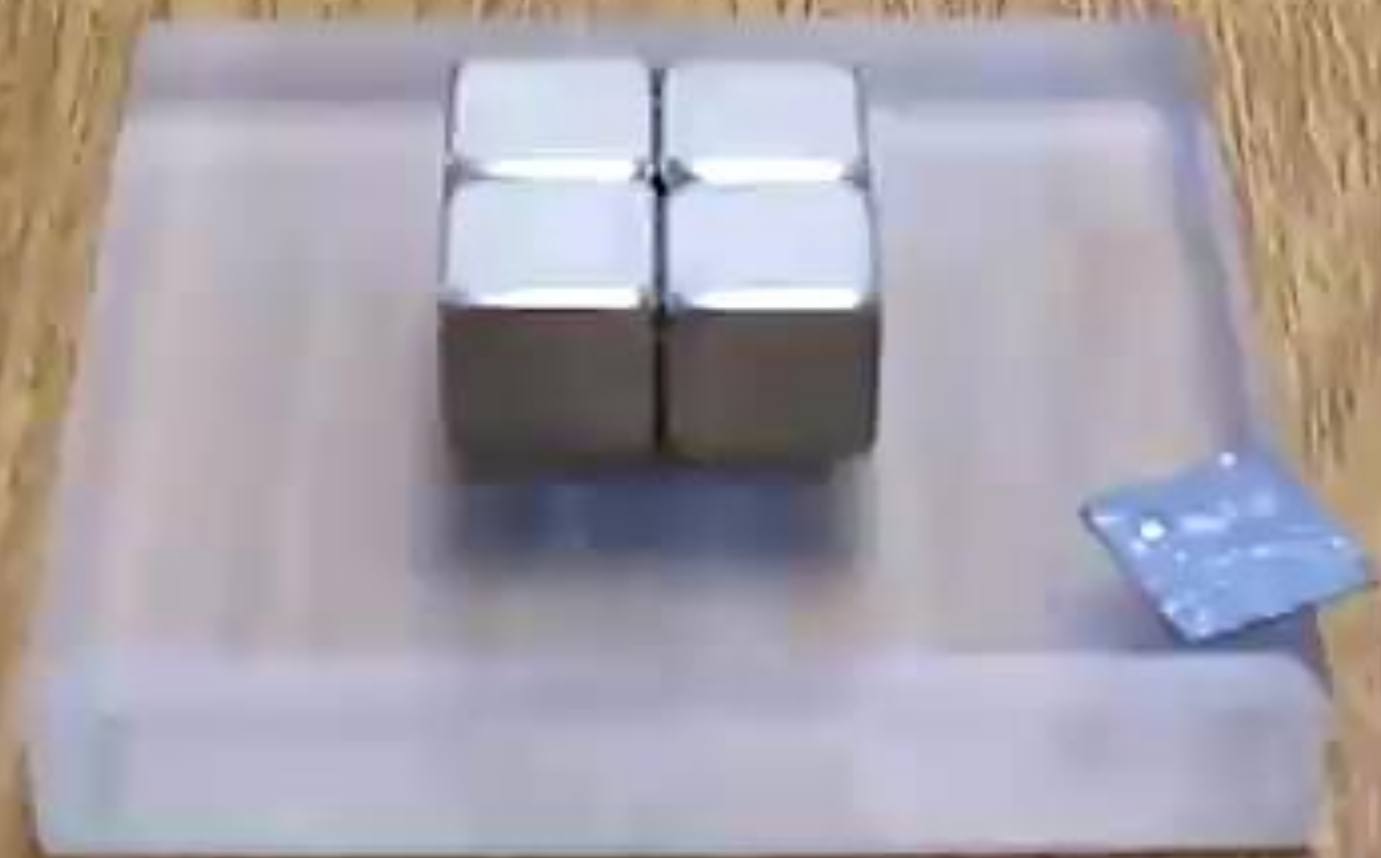
浮かすための磁場は強いだけではダメ。
一様な磁場でなく、左上の図のように
強さの変化が重要。

N	S	N	S	N
S	N	S	N	S
N	S	N	S	N
S	N	S	N	S
N	S	N	S	N









市松模様のネオジム磁石板を用いたおまけ実験

この板に1円玉(アルミニウム)を乗せて垂直にしてみる。

原理は電磁誘導(21章)で解説

アルミニウムは常磁性であるが関係ない。1円玉が導体であることが重要。

市松模様でなく、一様な磁場なら、この現象も起こらない。

常磁性体

常磁性体は、磁極を近づけると近づこうとする。

鉄などの磁石につく強磁性体と同じだが、その力はとても弱い。

動画: 常磁性体の液体酸素と強力な電磁石の反応

液体酸素の沸点: -183°C

液体窒素の沸点: -196°C

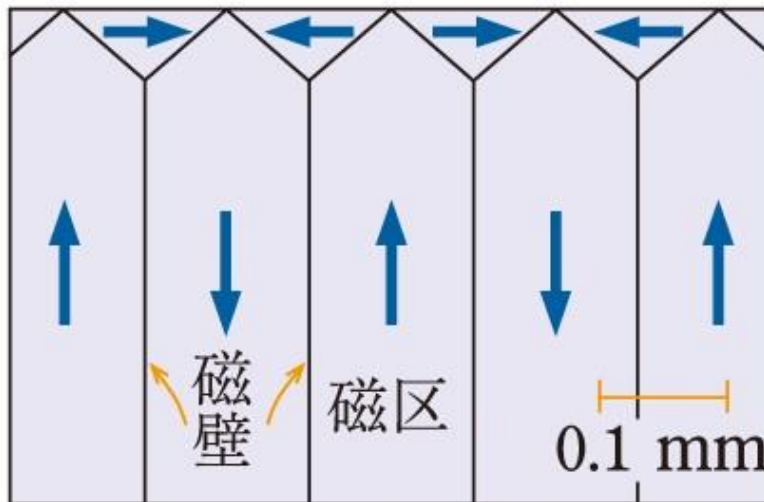


スライド⑩⑪で、先の尖った電磁石があったが、この動画の電磁石もそうになっている。

様々な物質の磁気感受率 χ_m と比透磁率 μ_r

	磁気感受率 χ_m	比透磁率 $\mu_r (1+\chi_m)$
強磁性体	鉄(99.8%)	5000
	液体酸素	1.003460
常磁性体	マンガン	1.000830
	アルミニウム	1.000021
	水	0.999992
反磁性体	銅	0.999990
	炭素(グラファイト)	0.999984
	ビスマス	0.999834

例：鉄，コバルト，ニッケル，これらを主成分とする合金等
量子力学的な効果で原子の磁気モーメントが自発的に同一の方向を向く
(実際には、磁区と呼ばれる区域内で同一，区域の境界を磁壁という)



矢印は磁化の方向
磁区の大きさは $10^{-7} \sim 10^{-2}$ cm
左の図の場合、全体では、 $M = 0$

強磁性体を磁場中にいれると・・・

- ① 磁場の方向に磁化していた磁区が成長
 - ② 磁区の磁化の向きが磁場の方向を向くように回転
- } 磁化する。

問題・実験：磁石につく？つかない？

①100円玉（白銅：銅75%,ニッケル25%）

ニッケルは強磁性体で磁石につく。

つかない

②18-8ステンレス（鉄74%,クロム18%,ニッケル8%）



ほとんどつかない

③18-0ステンレス（鉄82%、クロム18%）

つく



磁性を荷っているのは主に電子。

鉄やニッケル、コバルトの原子核が磁石につくわけではない。

化学結合等によって電子の状態が変化すれば、磁石につかなくなる。

例： Fe_2O_3 （赤さび）は磁石につかないが、 Fe_3O_4 （黒さび、磁鉄鉱）はつく。

磁化曲線(ヒステリシスループ)

⑪

すべての磁気モーメントが磁場の方向を向いている
磁化が飽和した状態(飽和磁化)

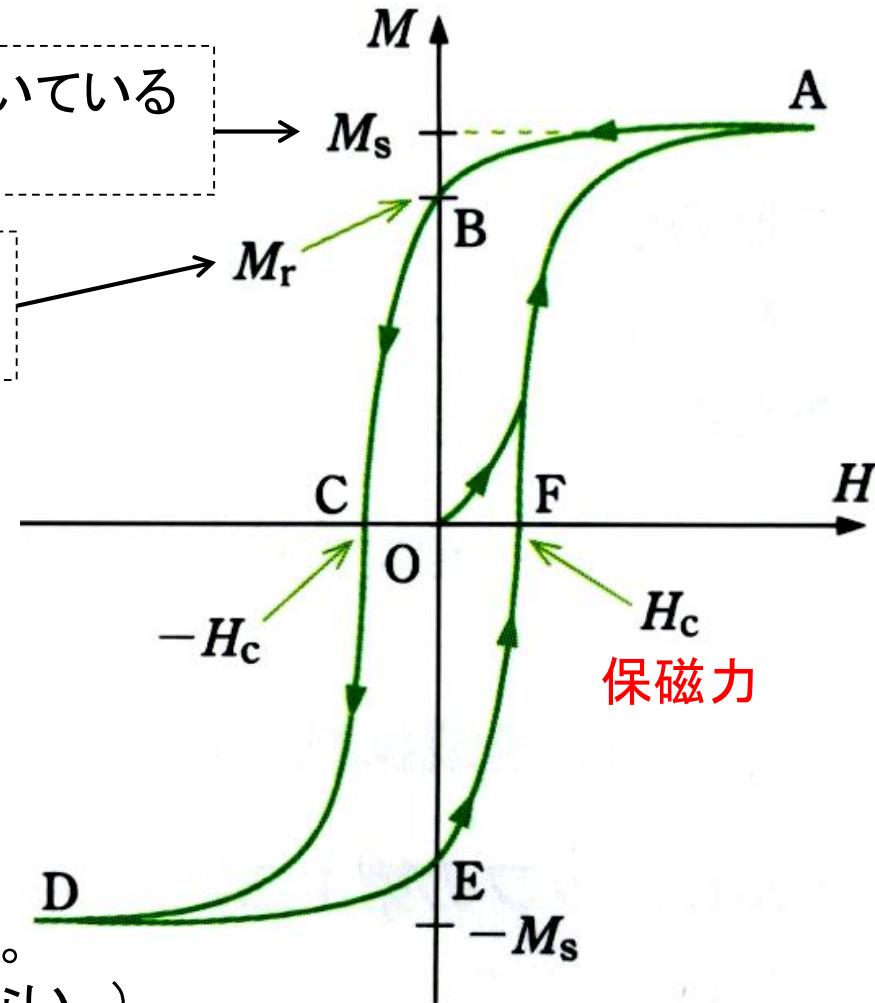
H を0にしたときに残っている磁化
残留磁化(永久磁石)

磁性体の材質等の違いより磁化曲線は
様々(ヒステリシスの大小等)

永久磁石の材料にはヒステリシスの
大きいもの(硬磁性材料)が良い。

変圧器(21章)の鉄心にはヒステリシスの
小さいもの(軟磁性材料)が良い

$M = \chi_m H$ は強磁性体では成り立っていない。
(右上のグラフで原点を通る直線になっていない。)



磁気ヒステリシス: ある磁場 H における磁化 M が過去の磁化の歴史に関係すること
例: 上の図で同じ $H = 0$ でも過去の違いで磁化は M_r であつたり $-M_r$ であつたりする。

磁化率

ほとんどの磁性体では、磁化 M は磁化を引き起こした磁場 H に比例する。

$$M = \chi_m H$$

無次元の比例定数 χ_m :

磁気感受率(磁化率)

このような場合は
磁場 B より磁場 H がよい
磁場 B は磁化 M
によって変化するが
磁場 H は変化しない

例外: 永久磁石は、磁場 H がなくても磁化している
(後で説明)

$$B = \mu_0 (H + M)$$

$$B = \mu_0 (H + \chi_m H)$$

$$B = \mu_0 (1 + \chi_m) H$$

$$\text{比透磁率 } \mu_r = 1 + \chi_m$$

$$B = \mu_r \mu_0 H = \mu H$$

($\mu = \mu_r \mu_0$ を

透磁率

という) $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ は誘電率

電気感受率

↓

$$\text{比誘電率 } \varepsilon_r = 1 + \chi_e$$

ソレノイドの内部を
磁性体で満たすと
磁場 B は μ_r 倍
($\mu_0 H \rightarrow \mu_r \mu_0 H$)

真空の比透磁率 μ_r は 1 (磁気感受率 χ_m は 0) なので「真空」の「透磁率」は μ_0

真空の比誘電率 ε_r は 1 (電気感受率 χ_e は 0) なので「真空」の「誘電率」は ε_0

残留磁化の実験(着磁)

⑱

方位磁石(コンパス)の磁針は、棒磁石である。(赤N極, 白S極)

①六角レンチ(鉄)の端をネオジム磁石のN極に接触させる。

六角レンチ

S ネオジム磁石 N

②接触させた六角レンチの端をコンパスに近づけてみる。

六角レンチの端は S 極

③六角レンチ(鉄)の端をネオジム磁石のS極に接触させる。

六角レンチ

N ネオジム磁石 S

④接触させた六角レンチの端をコンパスに近づけてみる。

六角レンチの端は N 極

⑤着磁したスプーンを、鉄に近づけ、磁石になっているか確認する。

問題:スプーンを消磁(磁石でなくする)にはどうすればよいか?

キュリー温度

ピエール・キュリー
(妻はキュリー夫人)

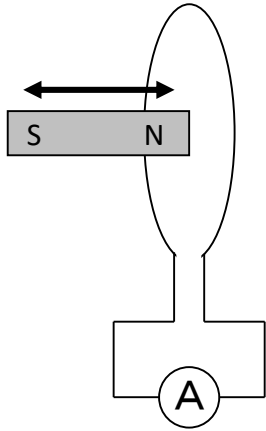
温度が上がると、強磁性体は熱運動のため飽和磁化 M_s が小さくなり、
キュリー温度で 0 (常磁性体) になる。

永久磁石もキュリー温度以上に熱すると磁化を失い、冷やしてももとに戻らない
フェライト磁石 (普通の磁石) : 460°C 、鉄 : 770°C

キュリーエンジン

動画を見てしくみを考えてみて下さい。





コイルの内部を貫く磁束の変化が
コイルに**起電力**を生じさせ、**電流**が流れる。

(**誘導起電力**)

(**誘導電流**)

この現象を

電磁誘導

という

レンツ

の法則

電磁誘導によって生じる誘導起電力は、それによって流れる
誘導電流のつくる磁場が回路を貫く磁場の変化を妨げる向きに生じる

実験で
確認

- ① コイルに磁石を近づけたり、遠ざけたりすると電流が流れる。
- ② 近づけるときと遠ざけるときでは電流の向きが逆。
- ③ 磁石がコイルの中にあっても静止させると電流は流れない。
- ④ N極を近づける時と、S極を近づける時は電流の向きが逆。

注意：実験で使う電流計(検流計)は少し反応が遅い。

電磁誘導を式にまとめると

$$V_i = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

V_i : 誘導起電力

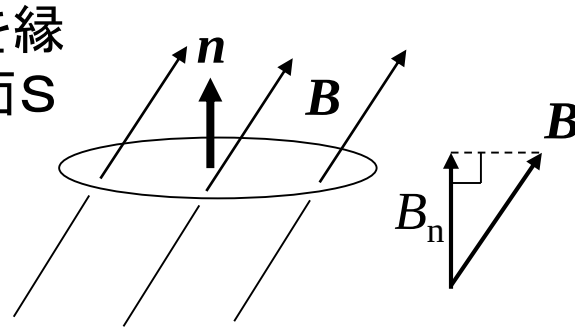
Φ_B : コイル(面S)を貫く磁束
比例係数はつかない

$$\Phi_B = \iint_S B_n dA \text{ [Wb] (ウェーバー) [T} \cdot \text{m}^2]$$

B_n : 磁場 B のコイルの面Sの法線方向成分

符号はあまり気にしなくてよい。

誘導起電力の向きと磁束の向きの関係は
レンツの法則より判断せよ。



N 巻きのコイルに全体に生じる誘導起電力

$$V_i = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

④の実験で、導線を2重巻き、3重巻きにして
実験すると、誘導起電力も2倍、3倍になる。

ここで Φ_B はコイル1巻きを貫く磁束

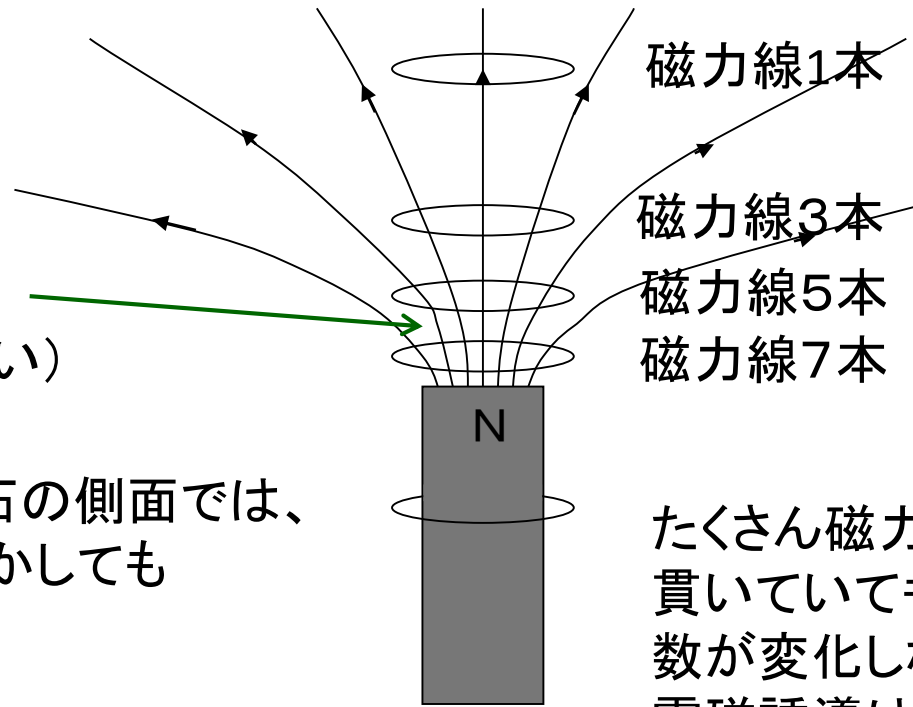
棒磁石を使った電磁誘導の実験の解説

⑥

このあたりで上下に動かすと
最も誘導起電力が大きい
(回路を貫く磁束の変化が大きい)

長い棒磁石の場合は、棒磁石の側面では、
磁力線の出入りが少なく、動かしても
誘導起電力は小さい

実験で確認



たくさん磁力線が
貫いていても
数が変化しないと
電磁誘導は起こらない

問題: 上の図でコイルを上から下に移動させるとコイルを流れる電流の向きは？

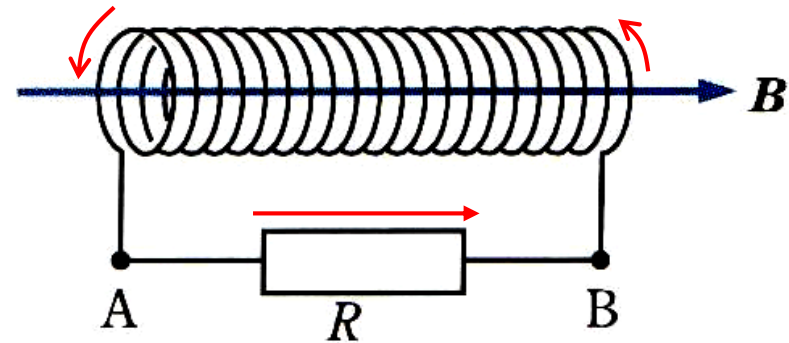


上向きに貫く磁力線が増えるので

誘導電流の作る磁場は下向き

例1 (p270) 図のような巻き数 2000 のコイルを矢印の向きに貫いている磁束 Φ_B が、⑦
1秒間に $1.0 \times 10^{-3} \text{ Wb}$ の割合で増加している。
(1) コイルに生じる起電力の大きさはいくらか？

$$V_i = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -2000 \times 1.0 \times 10^{-3} = -2 \text{ V}$$



(2) コイルに流れる電流の向きを図に書き込め。

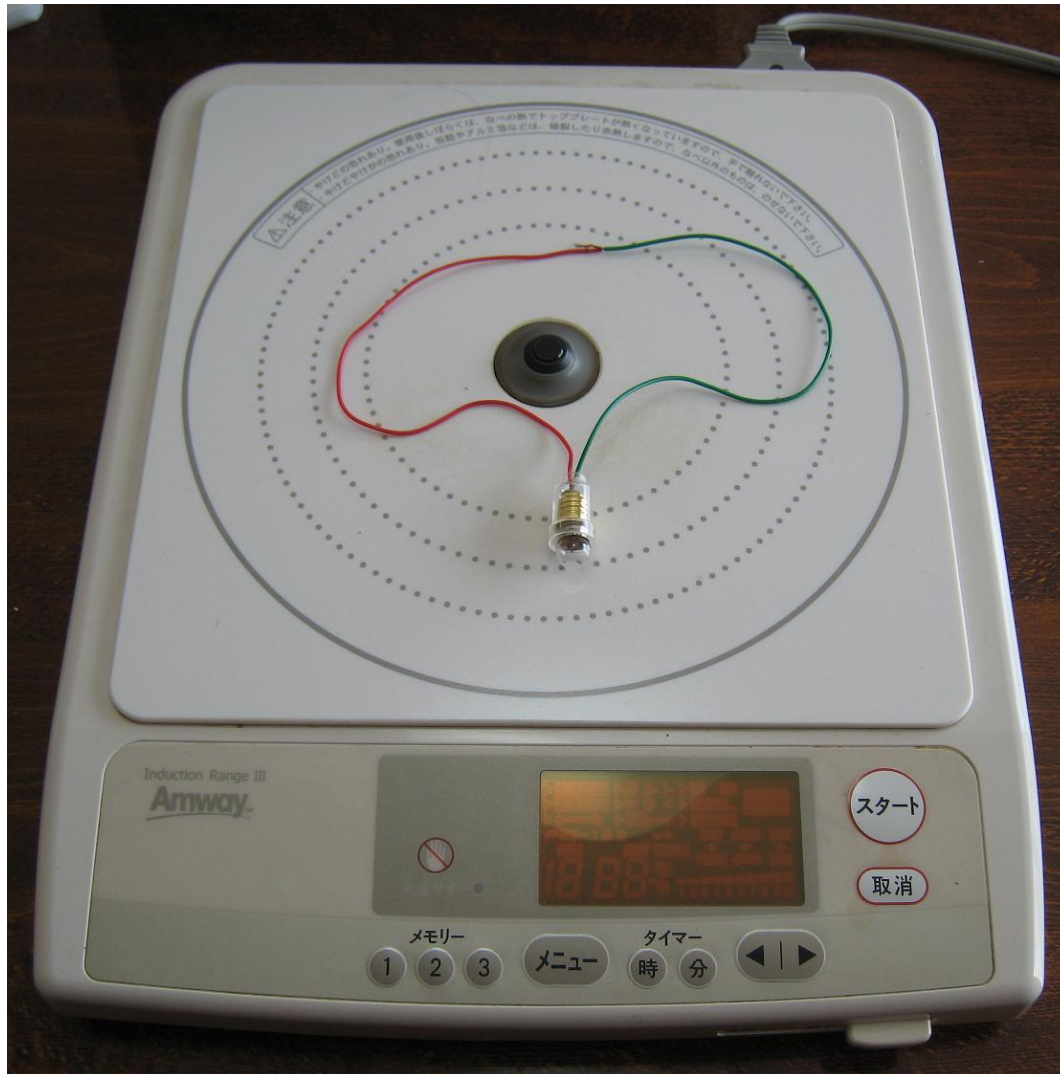
(3) 抵抗 R の大きさを 100Ω とすると、回路に流れる電流の大きさはいくらか。
コイルの抵抗は無視できるものとする。

$$V = RI, \quad 2 = 100 \times I, \quad I = 0.02 \text{ [A]}$$

IH クッキングヒーター(電磁調理器)

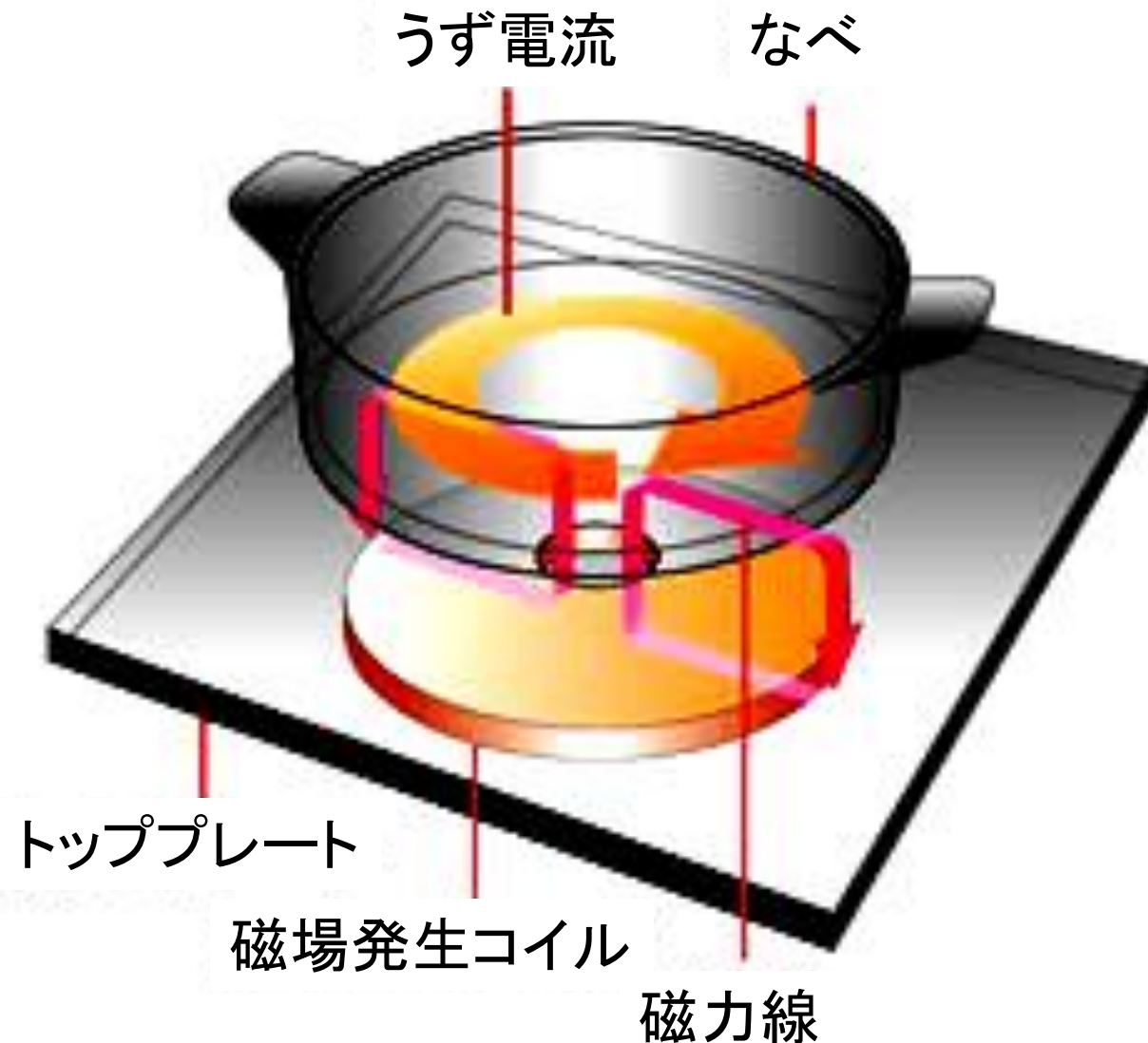
⑧

Induction Heating
(誘導加熱)



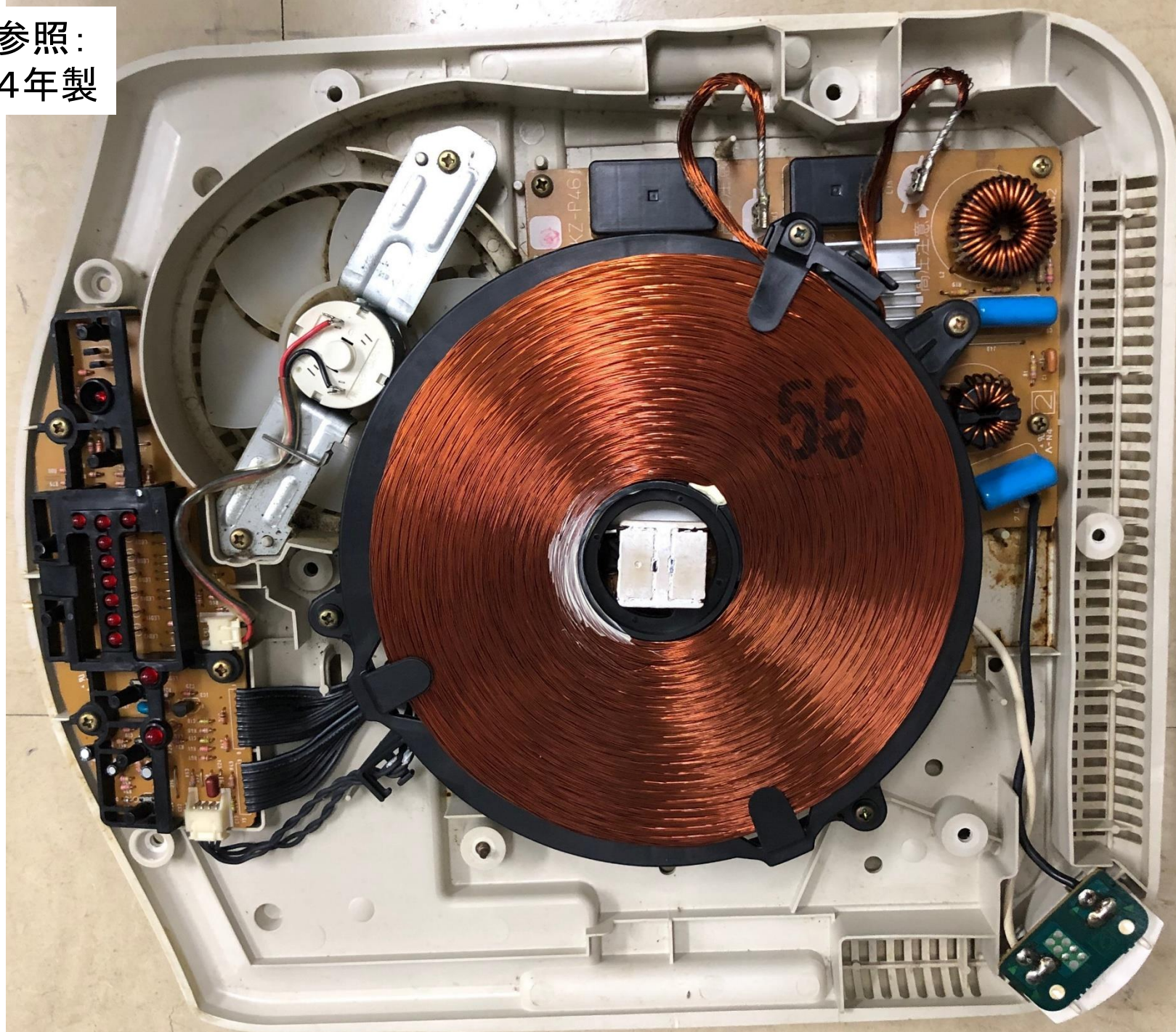
実験

左の写真のように豆電球の
ソケットの導線の両端を
接続して輪をつくり
(回路中に電源はない)
IHクッキングヒーターの上に
乗せ出力最低でスイッチを
入れてみる。



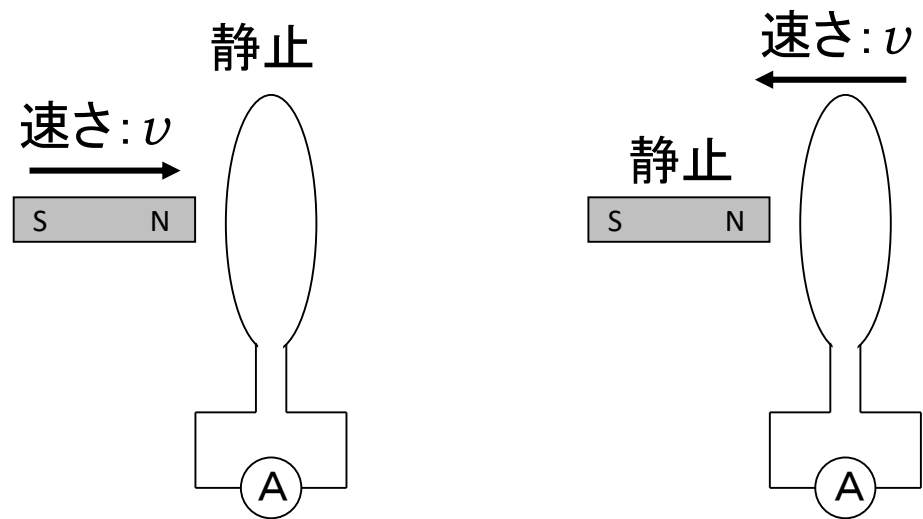
IHクッキングヒータの
磁場発生コイルに交流を
流すと磁場が変動し、
その磁場を打ち消す方向に
鍋底に渦電流(誘導電流)
が流れる。鍋は適当な
電気抵抗の鉄鍋が良い。
ジュール熱: $Q = RI^2t$
陶器の鍋(絶縁体)は不可。
電気抵抗の小さい銅や
アルミの鍋も不可。
(最近は銅・アルミの鍋も
使用できるものが多い)

实物参照：
1994年製



問題：磁石を動かす場合とコイルを動かす場合で誘導起電力の大きさ(この場合、計測するのは電流計の値)に違いはあるか？ヒント：電磁誘導の法則はどちらの場合も成り立つ(どの慣性系でも成り立つ)。

$$V_i = - \frac{d\phi_B}{dt}$$

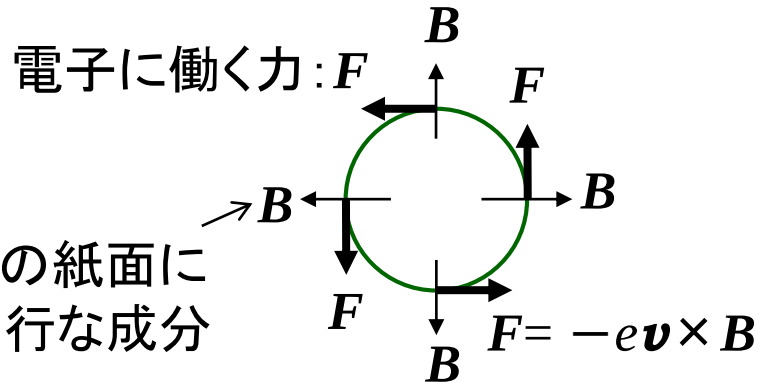
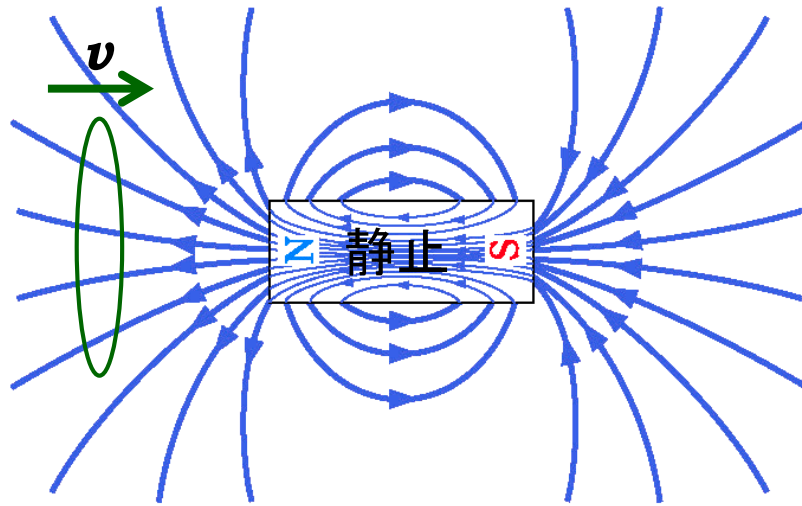


違いはない。
 同じ現象も、見る人によって右のように見えたり、左のように見えたりする。
 同じ現象なので、電流計の値は当然同じ。

この2つの場合をローレンツ力 $F = qE + q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ で考えてみる。
 磁場中の電流に働く力は、電流を荷う電子に働くローレンツ力の和で理解できた。

コイルが移動，磁石は静止している場合（磁石が静止している系で考える） ⑫

この方向から
コイルを見ると



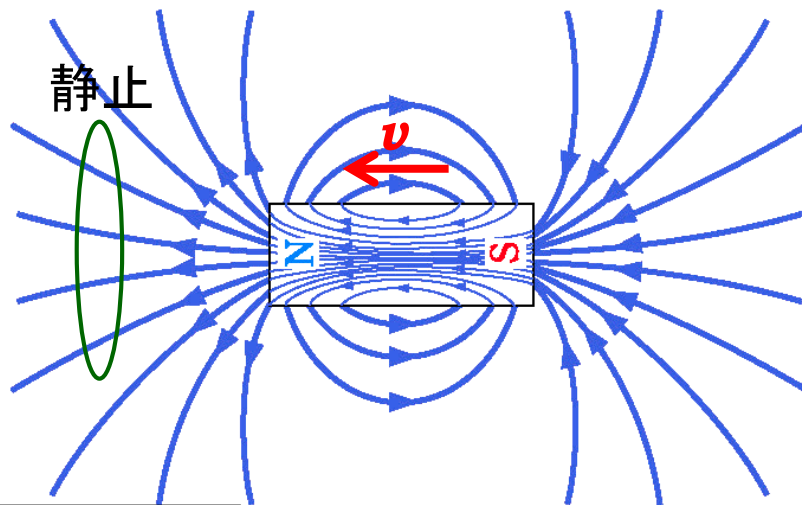
コイル中の電子に働く磁気力が
誘導起電力の源である。

起電力とは回路に電流を流そうという
働きのことで、その源が磁気力でもよい。

コイルの速度を $\mathbf{v} \otimes$

（コイル中の電子のドリフト速度は小さいので無視した）

コイルは静止しているので
コイル中の電子には
 $q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ 磁気力は働かない。
よって誘導起電力の
源は電気力である。



磁場が変化すると

誘導電場

が発生する。

誘導電場の電気力線は
右の図のように始点も終点もない
閉じた曲線→電位定義できない

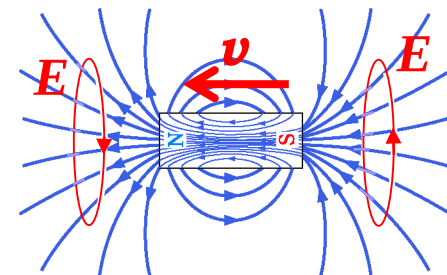


図20.5

$$V_i = \oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = \oint_C E_t ds = - \frac{d\Phi_B}{dt} = - \iint_S \frac{\partial B_n}{\partial t} dA$$

（誘導起電力は誘導電場による）

E_t は誘導電場 E の閉曲線 C の接線方向成分

①コイルが移動, 磁石は静止 磁石が静止している系で考える	②磁石が移動, コイルは静止 コイルが静止している系で考える
磁場 B : 変化しない	磁場 B : 変化する
誘導電場 E : 無	誘導電場 E : 有
電子に作用する力: $-e\mathbf{v} \times \mathbf{B}$	電子に作用する力: $-e\mathbf{E}$

等しい

ガリレイの相対性原理: 物理法則はどのような慣性系でも等しく成り立つ

特別な慣性系はない。どの慣性系も平等

上の2つの場合にガリレイの相対性原理をあてはめてみると・・・

電荷 q にはローレンツ力 $\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ が働くという物理法則は、
どの慣性系でも等しく成り立っている。

しかし、同じ物体の速度が慣性系によって異なるように
慣性系によって同じ場所の電場 E や磁場 B は異なっている。

電場と磁場の座標変換はこの講義では取り扱わない。
興味のある人は教科書 23.5「電磁場と座標系」p304 を読んで下さい。

電磁誘導の法則(再考)

$$V_i = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

V_i : 誘導起電力

Φ_B : コイル(面S)を貫く磁束

電磁誘導の法則(上の式)はどのような慣性系でも成り立つ

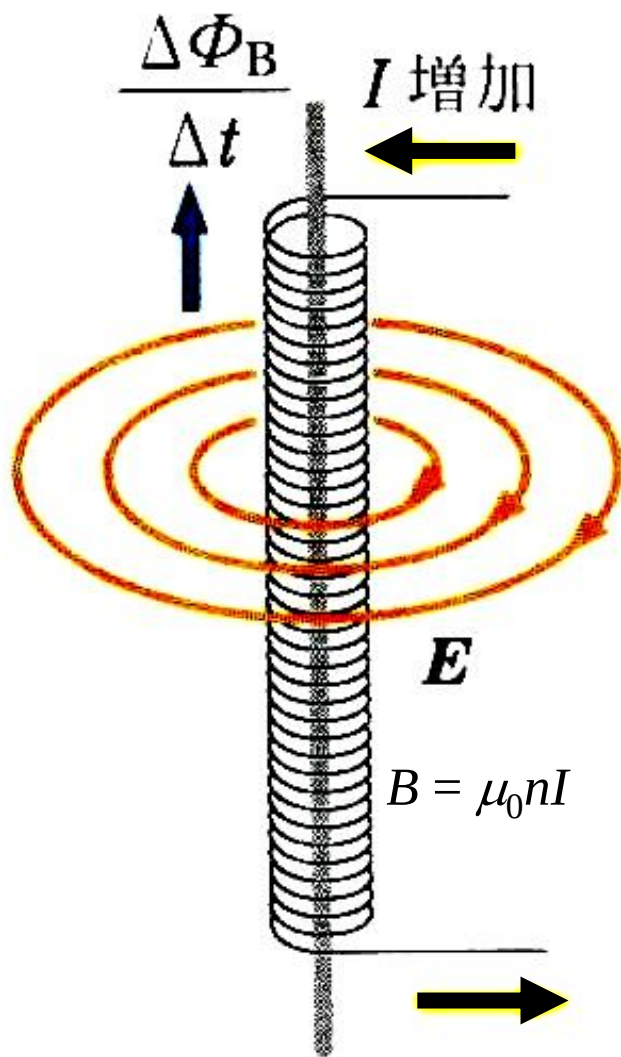
- ① コイルが移動, 磁石は静止している場合
 - ② 磁石が移動, コイルは静止している場合
- } 両方成り立つ

磁石もコイルも運動している系でも成り立つ
(コイルを貫く磁束 Φ_B は慣性系によらない。)

問題：下の図のコイルの半径は R で十分に長いとする。コイルを流れる電流 I は増加中であるとする。コイルを貫く磁束 Φ_B を求めよ。

$$B = \mu_0 n I$$

$$\Phi_B = \mu_0 n I \times \pi R^2 = \mu_0 n I \pi R^2$$



コイルの中心軸を中心とする半径 r ($r > R$) の円形の1巻きのコイルに生じる誘導起電力の大きさを求めよ。 dI/dt を用いてもよい。

$$V_i = \frac{d\Phi_B}{dt} = \mu_0 n \pi R^2 \frac{dI}{dt}$$

コイルの中心軸から距離 r ($r > R$) の点の誘導電場の大きさを求めよ。 dI/dt を用いてもよい。

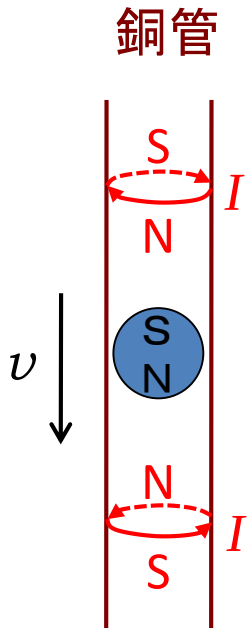
$$V_i = \int E_t ds = 2\pi r E$$

$$\cancel{2\pi r} E = \cancel{\mu_0 n \pi} R^2 \frac{dI}{dt}$$

$$E = \frac{1}{2r} \mu_0 n R^2 \frac{dI}{dt}$$

実験① 鉄球を銅管に落としてみる。

実験② ネオジム磁石球を銅管に落としてみる。



左図のように、S極が上、N極が下の状態で落下する場合、ネオジム磁石の上側では、下向きの磁場が減少する
よって下向きの磁場をつくる誘導電流が銅管に流れる。

誘導電流(円電流)は、電磁石と同等であり、
誘導電流の作る磁場は、ネオジム磁石を上向きに引っぱる。

ネオジム磁石の下側では、下向きの磁場が増大する
よって上向きの磁場をつくる誘導電流が流れる。
誘導電流の作る磁場は、ネオジム磁石を上へ押す。

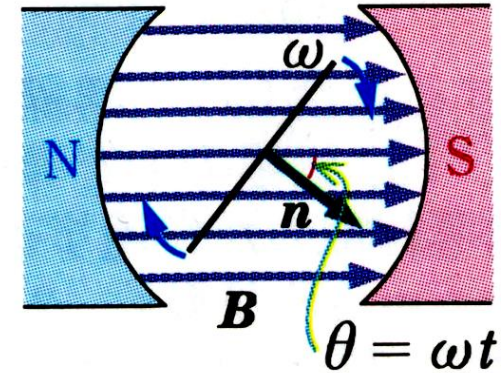
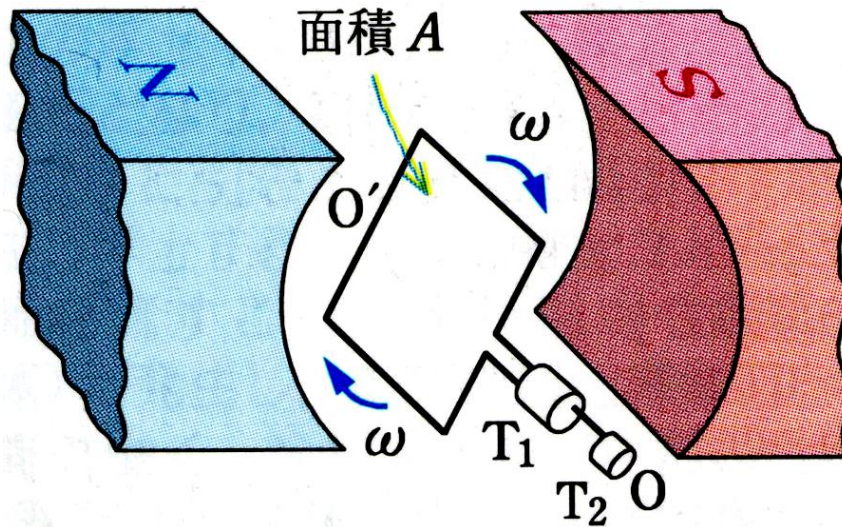
実験③ 見えやすいコの字型のアルミ板で実験

エネルギー保存則

鉄球を落下させると物体の位置エネルギーは運動エネルギーになる。
問題：ネオジム磁石の場合、位置エネルギーの大部分は何になるのか？

誘導電流が銅管で発生する熱(ジュール熱)

交流発電機



$\theta = 0$ のとき、 $\Phi_B = BA$
 $\theta = \pi/2$ のとき、 $\Phi_B = 0$
 $\theta = \pi$ のとき、 $\Phi_B = -BA$

$$\Phi_B = BA \cos \theta = BA \cos \omega t$$

電磁誘導の法則

$$V_i = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$V_i = BA\omega \sin \omega t$$

