

Q: レポートでやる実験は、授業で紹介されたものやインターネットで調べたものでいいのですか。

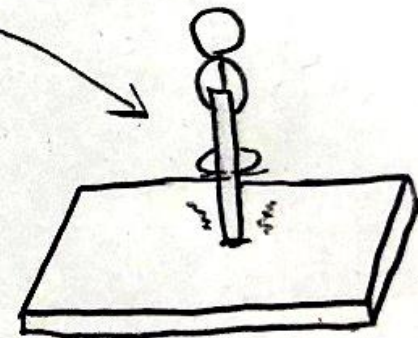
A: もちろん良いですよ。全く同じ実験をやっても色々と困難や、発見があって面白いかもかもしれませんよ。

Q: 内部抵抗の小さい電池の種類は何ですか？

A: 自動車のバッテリー等に使われる鉛電池の内部抵抗は約 0.01Ω とたいへん小さいです。ですので大きな電流が流れても内部抵抗による電圧降下は小さいです。エンジンをかけるときには、セルモーターには 300 A といった大電流が流れるようです。

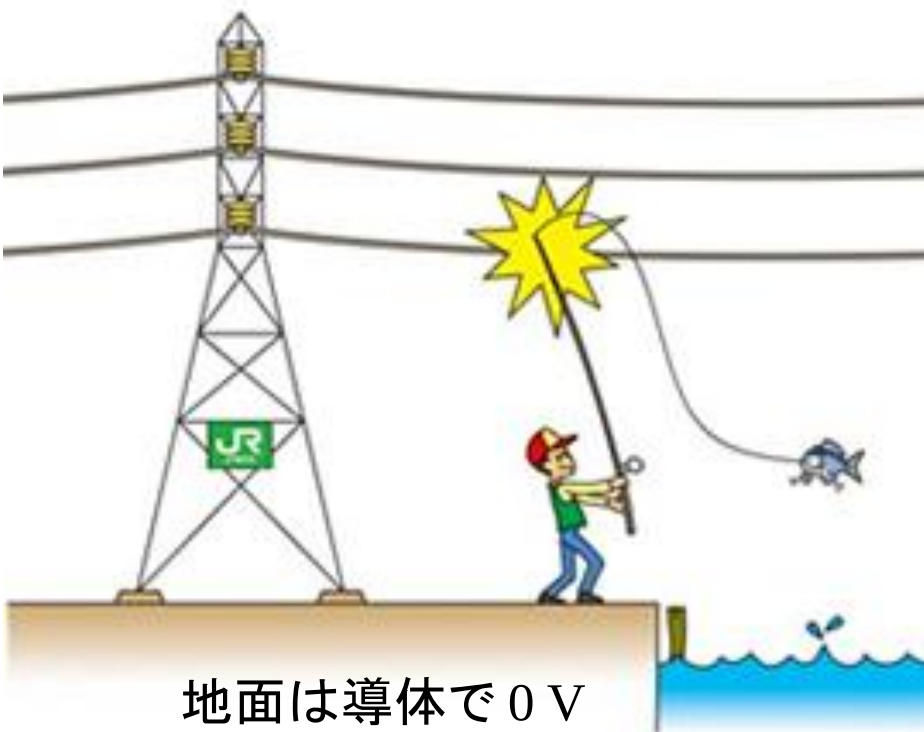
木の板に棒でグルグルさせて火をおこすためには、
どのくらいの摩擦熱が必要なのか？

A: 特別の道具を使わずに、手のひらと棒で火をおこすのはかなり難しいです。専用の道具を用いれば、煙が出るまでは割と簡単です(実演)。火をおこすのは、まわりに燃えやすいものを置くなど、もう一工夫必要です。



Q: 高圧送電線に触れることは、どれくらい危険ですか？

A: 重要なことは、身体に電流が流れるかどうかです。身近にある電柱の電線は6000 Vで電線にも被覆があり、鉄塔の送電線に比べると安全です。鳥は、電線に止まっていますが、ただ止まるだけでは電流の流れる道(回路)がないために、たとえ電線の被覆がなくても感電しません。別の電線に同時に触れたり、電線と地面・樹木と同時に触れたりすると、電流の流れる回路ができて感電します。



棒磁石

(北Northを向く極) N極  S極 (南Southを向く極)
 北極はS極 南極はN極

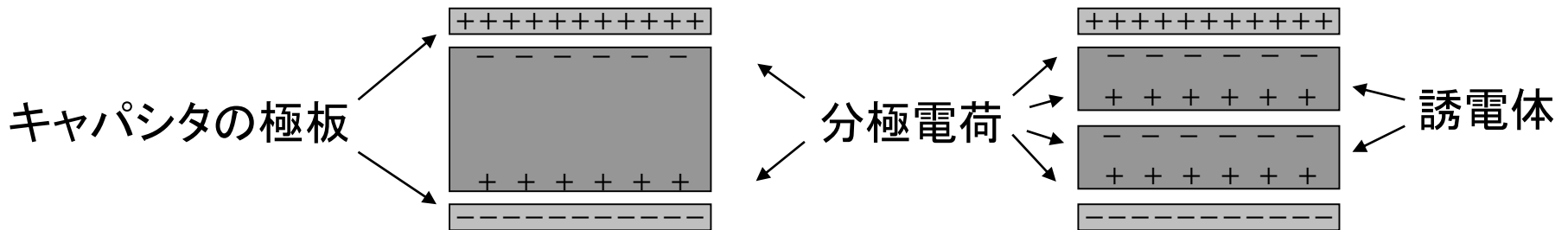
N極  S極 N極  S極

棒磁石を2つに分離すると、切り口にS極とN極が現れて2個の磁石になる。

単磁極(N極だけとかS極だけ)は取り出せない。

これは、電場中に置いた誘電体の表面に現れる分極電荷に似ている。

電場中で誘電体を分離しても、やはり切り口に分極電荷が現れ、
 正の分極電荷や負の分極電荷を単体で取り出せない。



似ている理由

分極した誘電体: 小さい電気双極子(分極した原子等)の集まり

磁石 : 小さい磁気双極子(小さい磁石)の集まり(後で勉強します)

磁荷

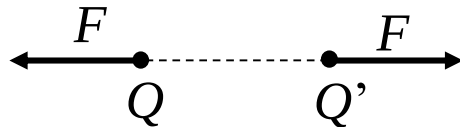
磁荷

: 磁極の強さ (電気力における電荷に対応) 記号 Q_m

電気力

$$F \propto \frac{QQ'}{r^2}$$

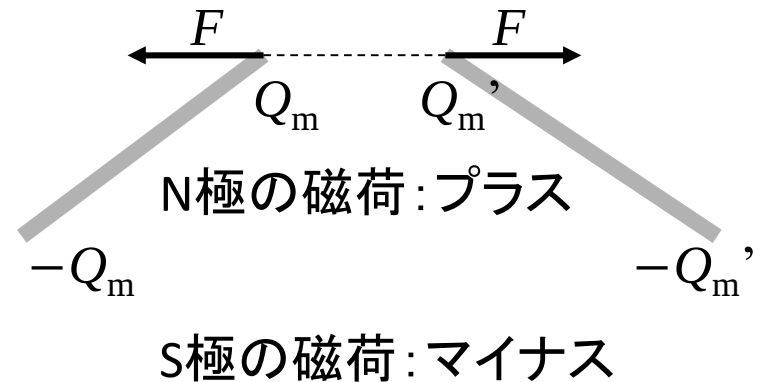
電気力の大きさは
互いの電荷の積に比例し、
互いの距離の2乗に反比例する。



磁気力

$$F \propto \frac{Q_m Q_m'}{r^2}$$

磁気力の大きさは
互いの磁荷の積に比例し、
互いの距離の2乗に反比例する。
(N極の磁荷を正、S極の磁荷を負とする)



高校では**磁束密度 B** といったが、この授業(教科書)では**磁場 B** という後で出てくる**磁場の強さ H** も、この授業(教科書)では**磁場 H** というこれらは、同じもの(呼び方が異なるだけ)で、記号も意味も同じ。
試験で、高校での呼び名を用いても正解です。

電気力

$$F = QE \text{ (真空中)}$$

(電気力 F , 電荷 Q , 電場 E の関係)

電場 E の単位: V/m , N/C

電荷の単位: C

磁気力

$$F = Q_m B \text{ (真空中)}$$

(磁気力 F , 磁荷 Q_m , 磁場 B の関係)

磁場 B の単位: テスラ(記号 T)

テスラは、後で別の方法で定義

磁荷の単位: N/T $= \text{A} \cdot \text{m}$ である
ことを後で説明

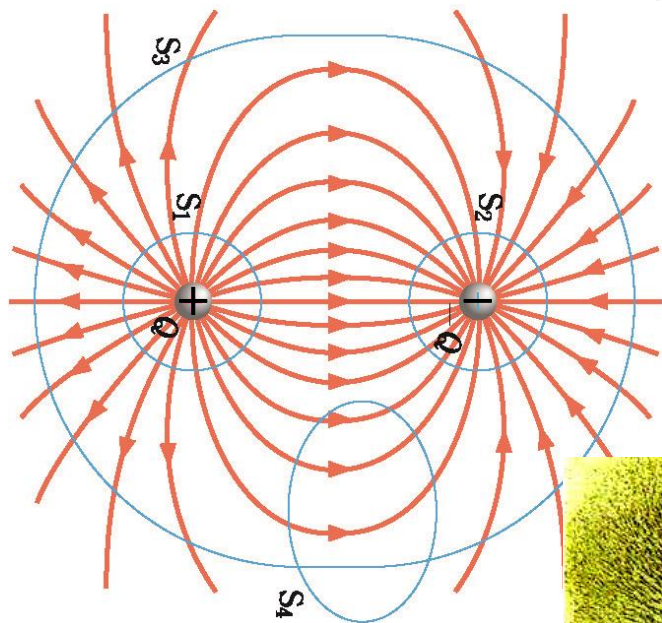
磁力線

: 磁場の様子を図示する線

各点での接線が、その場所の磁場の向きになるような曲線
電場の様子を図示する電気力線に対応

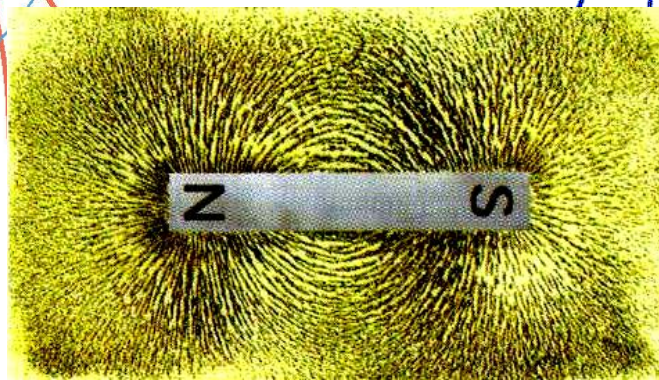
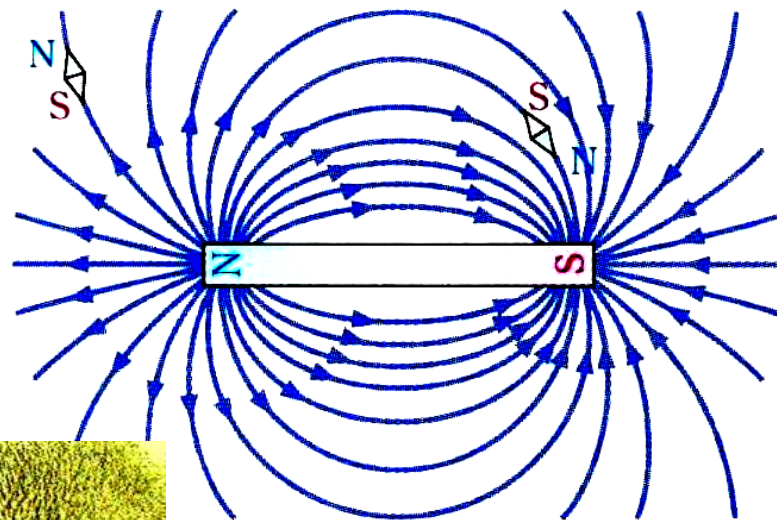
電気力線

プラス電荷で始まり
マイナス電荷で終わる



磁力線

N極で始まり
S極で終わる



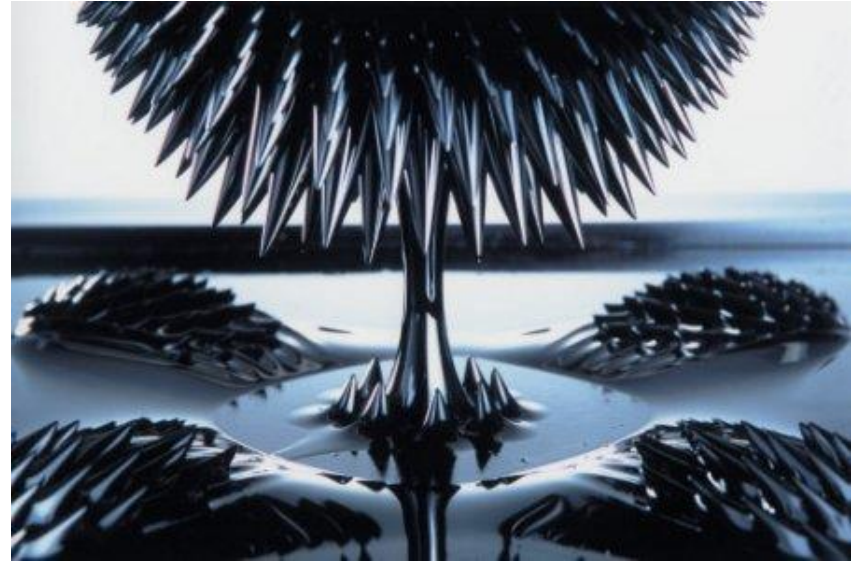
磁力線も目に見えないが、
砂鉄を使うと磁力線の様子を観察できる。

[実験] 磁性流体で遊ぼう

⑦

磁性流体：磁石につく細かな粒子を液体に
均一に溶かした(混ぜた)もの
イメージ：なめらかな液体になった砂鉄

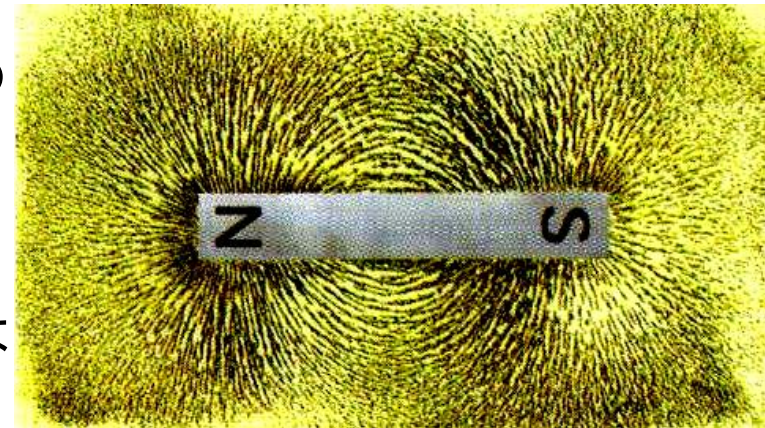
スパイク現象：磁力線に沿って右図のように
突起が現れる現象。砂鉄でもできるが、
磁性流体の方が美しい。

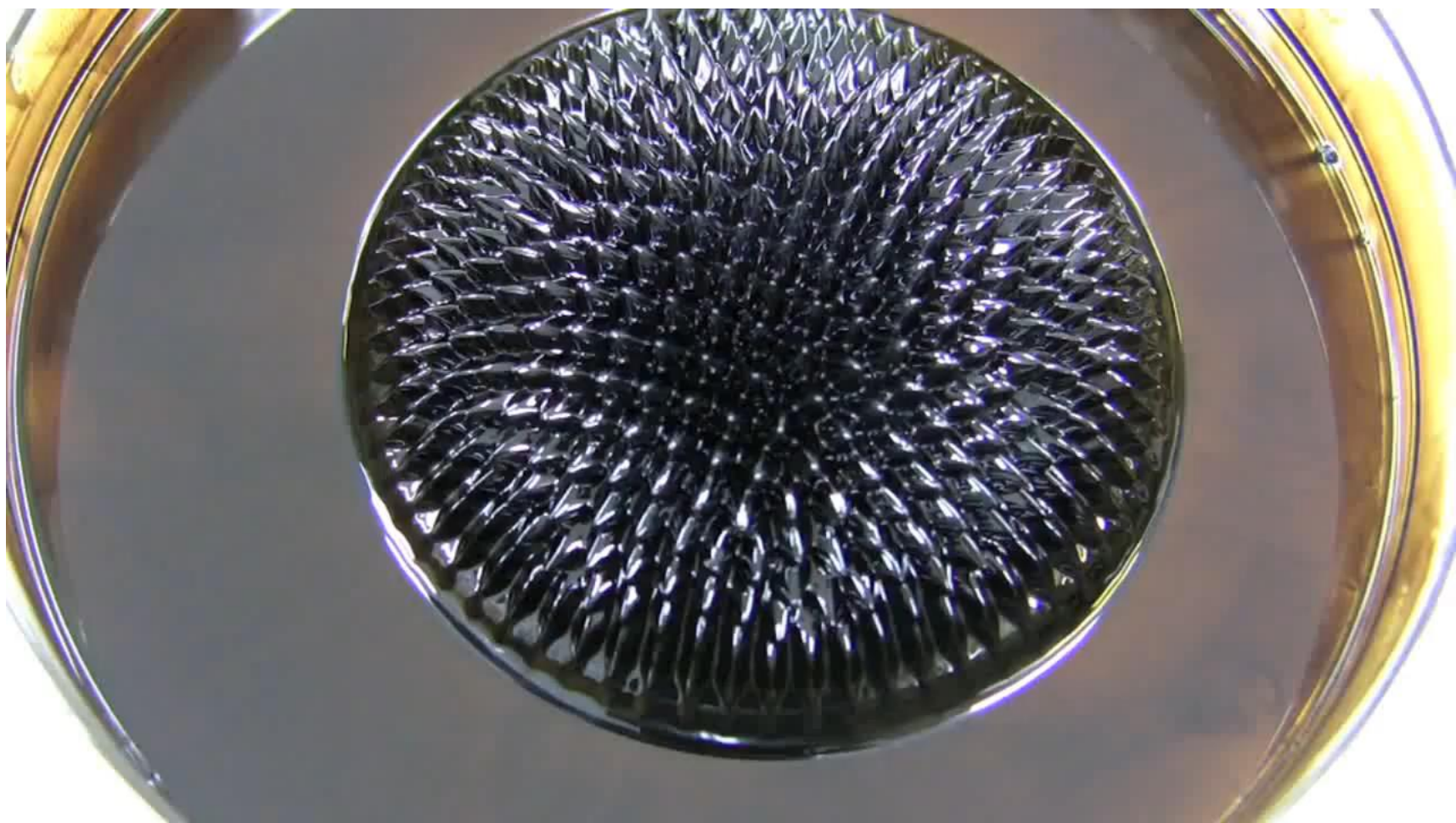


児玉幸子さんの磁性流体アート



砂鉄で磁場の
模様ができる
のと同じ原理
↓
突起の方向は
磁場の方向



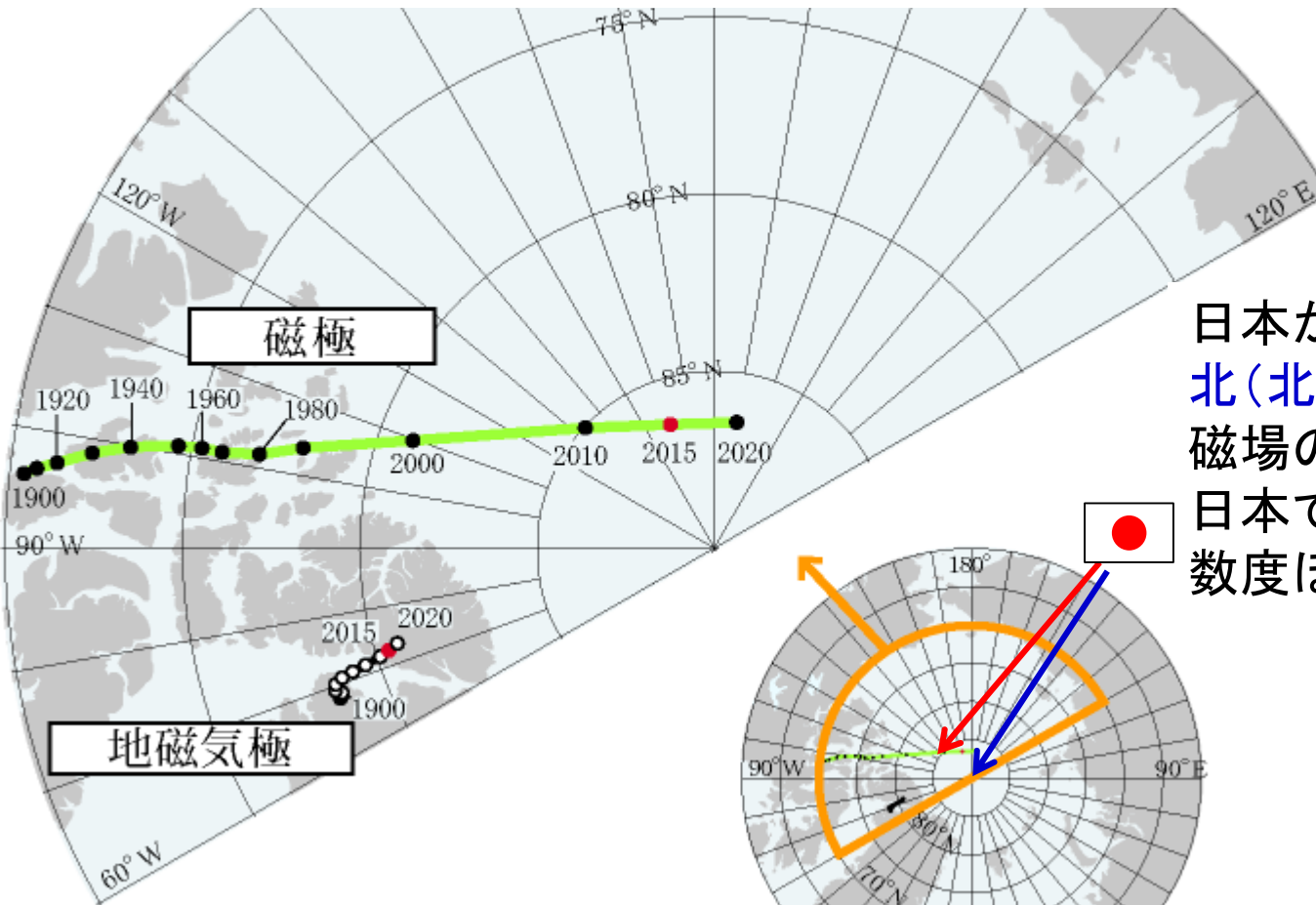


北極点：北緯90度の地点，自転軸と地球表面が交差する点

磁北極（磁極）：N極が真下を向く点（局所的な磁場の乱れの影響を受ける）

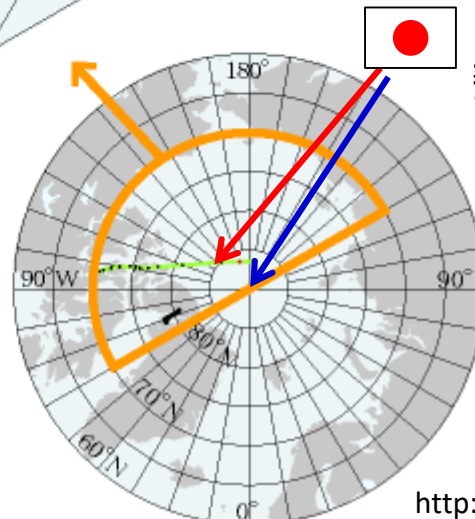
地磁気北極（地磁気極）：地磁気を地球中心にある双極子による磁場（双極子磁場）で近似したときのその双極子の軸と地表との交点

時間変化は小さい。



日本から見ると**磁北極**は
北（北極）よりも少し東よりだが
磁場の局所的な乱れのため
日本では、磁針は北より
数度ほど西を指す。

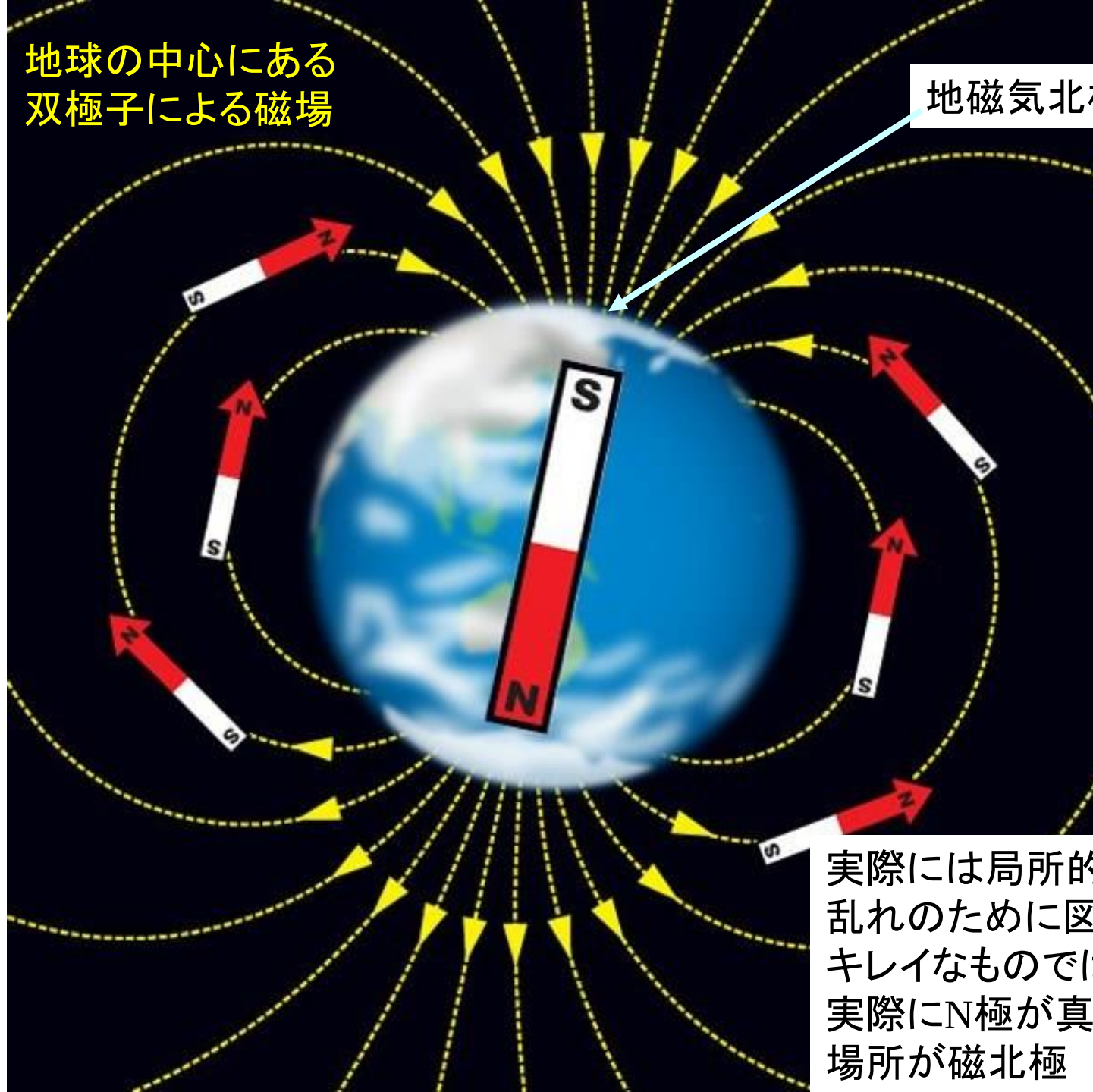
富山では約7度（偏角）
へんかく



北半球

地球の中心にある
双極子による磁場

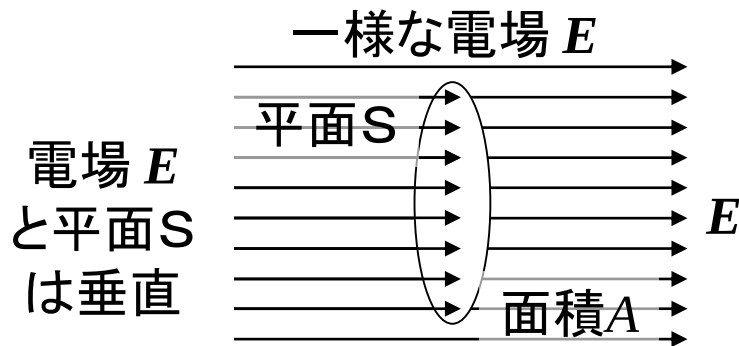
地磁気北極



実際には局所的な磁場の
乱れのために図のような
キレイなものではない。
実際にN極が真下を向く
場所が磁北極

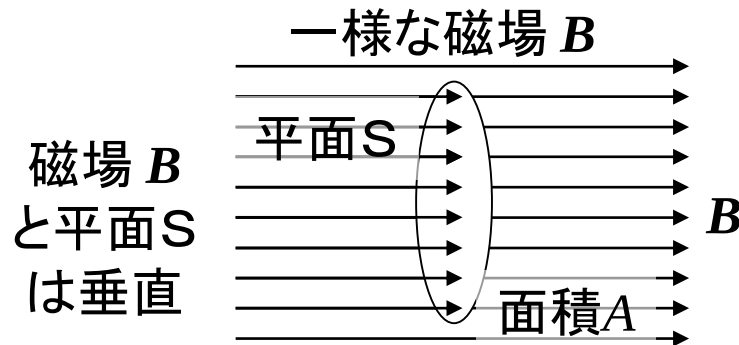
磁束 Φ_B (p244)

(磁束 Φ_B と磁場 B の関係は、電気力線束 Φ_E と電場 E の関係と同じ)



平面 S を貫く電気力線束 $\Phi_E = EA$

単位面積あたりの電気力線の本数を E とすると、
電気力線束 Φ_E は平面 S を貫く電気力線の本数
(電気力線は 1m^2 あたり E 本)



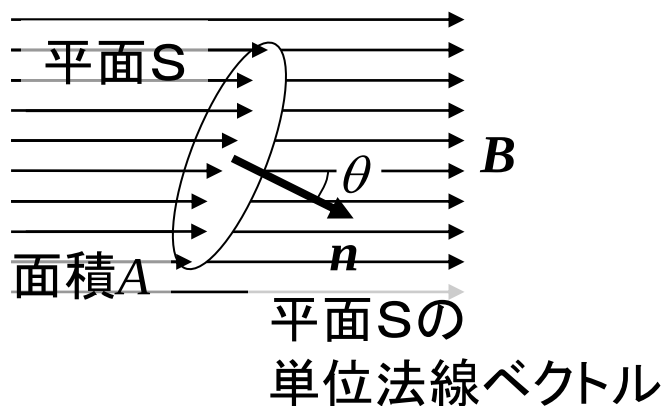
平面 S を貫く磁束 $\Phi_B = BA$

単位面積あたりの磁力線の本数を B とすると、
磁束 Φ_B は平面 S を貫く磁力線の本数
(磁力線は 1m^2 あたり B 本)

磁束 Φ_B の単位: $\text{T} \cdot \text{m}^2 = \text{Wb}$ (ウェーバー)

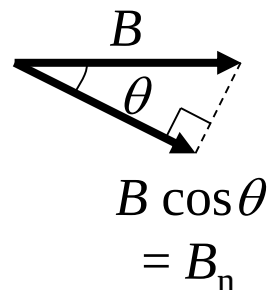
$$\Phi_B = BA$$

磁場 B と平面 S が垂直でない場合



平面Sを貫く磁束 $\Phi_B = BA \cos \theta = B_n A$
 (B_n は磁場 B の平面Sの法線方向成分)

$$B_n = B \cos \theta$$



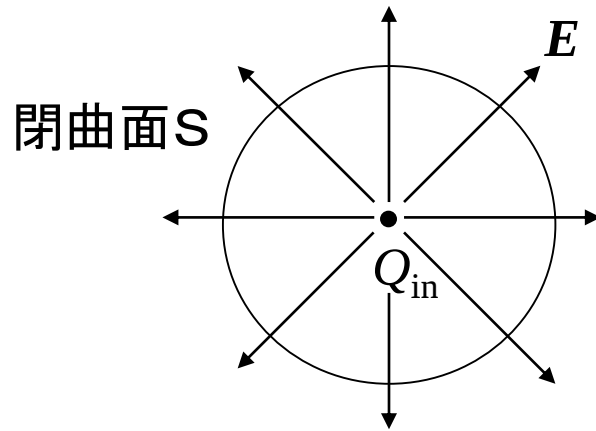
(対応) $\Phi_E = EA \cos \theta = E_n A$, $E_n = E \cos \theta$

曲面Sを貫く磁束は面積分を使って表すと

$$\Phi_B = \iint_S B_n \, dA$$

$$\Phi_E = \iint_S E_n \, dA$$

電場 E のガウスの法則

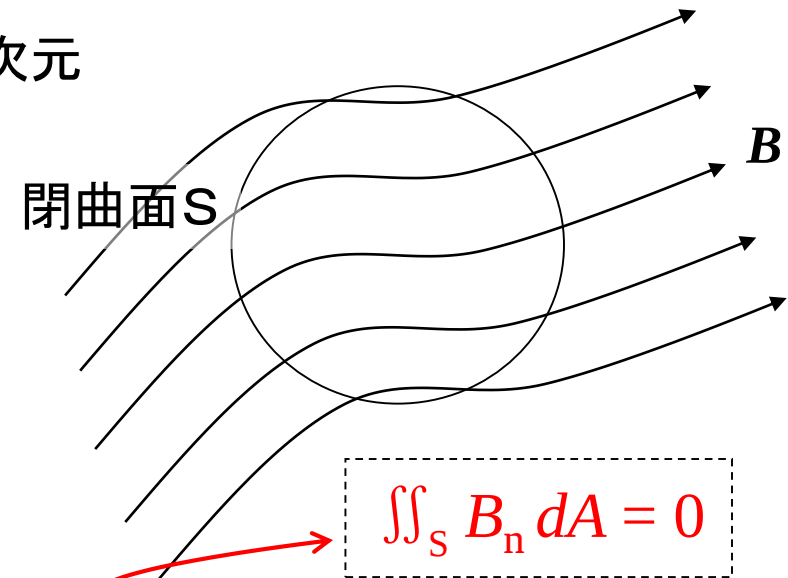


$$\iint_S E_n dA = \frac{Q_{in}}{\epsilon_0}$$

E_n は電場 E の閉曲面 S に対する
法線方向成分

磁場 B のガウスの法則

実際は3次元



$$\iint_S B_n dA = 0$$

磁力線は、始点も終点もなく
途中で途切れない閉曲線
(閉曲面に入った磁力線は必ず出ていく)
磁気単極子(分離した磁極)は存在しない
(モノポール)

この授業の最終目標である4つのマクスウェル方程式のうちの2つ

磁力線は、N極で始まりS極で終わるのではなかったのか？

答：磁石の外部はそうだが、内部は以下のようにっており、
磁力線は閉曲線である。詳しくは 20.6 節

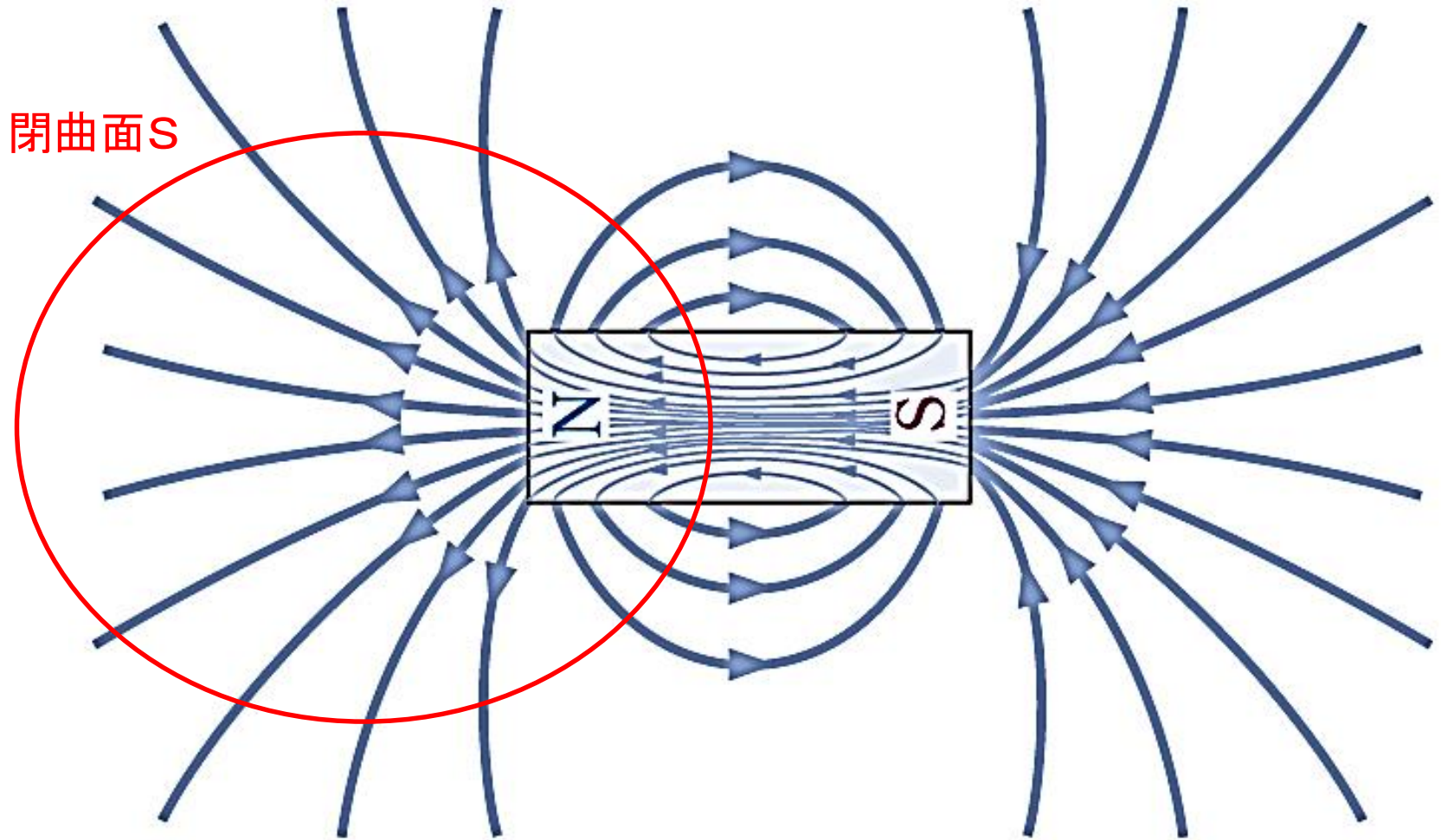
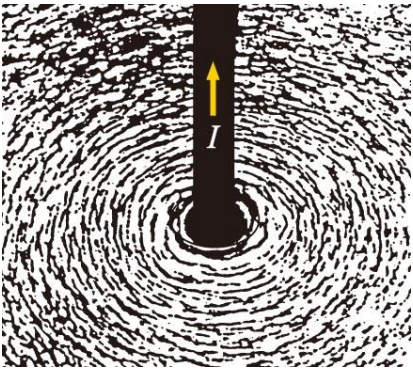
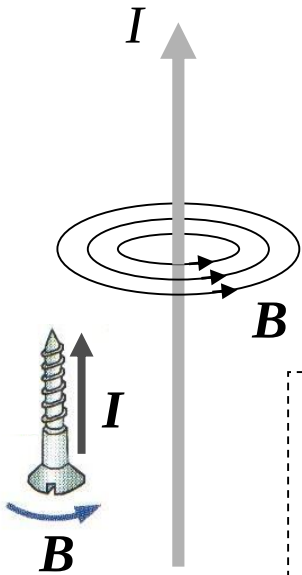


図 20.4

20.2 長い直線電流の作る磁場



磁力線は電線を中心とする円
始点も終点もない閉曲線



右ねじの規則

磁場の向き: 右ねじの回る向き
電流の向き: 右ねじの進む向き

右ねじ(一般的なねじ)
(時計回りに回すと閉まる)

無限に長い
直線電流 I の作る磁場 B

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d} \quad [\text{T}]$$

公式として導入するが
後で別の法則から導く

d : 電流からの距離

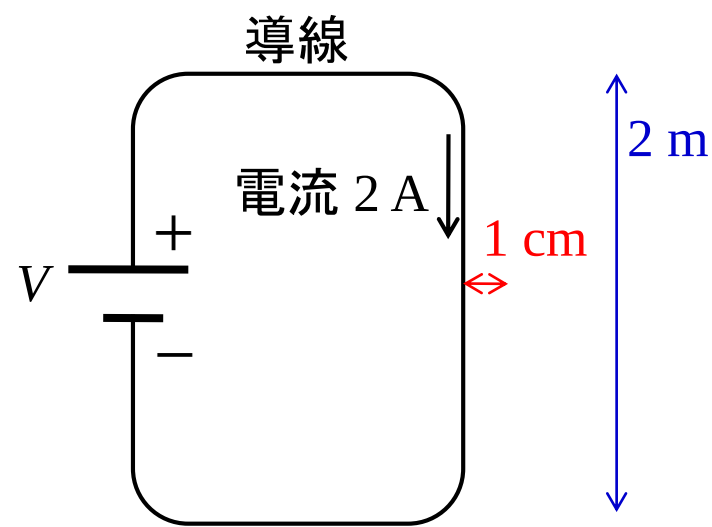
μ_0 :

**磁気定数
(真空の透磁率)**

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \quad [\text{T} \cdot \text{m/A}]$$

磁場 B の強さは、電流 I に比例し
電流からの距離 d に反比例する

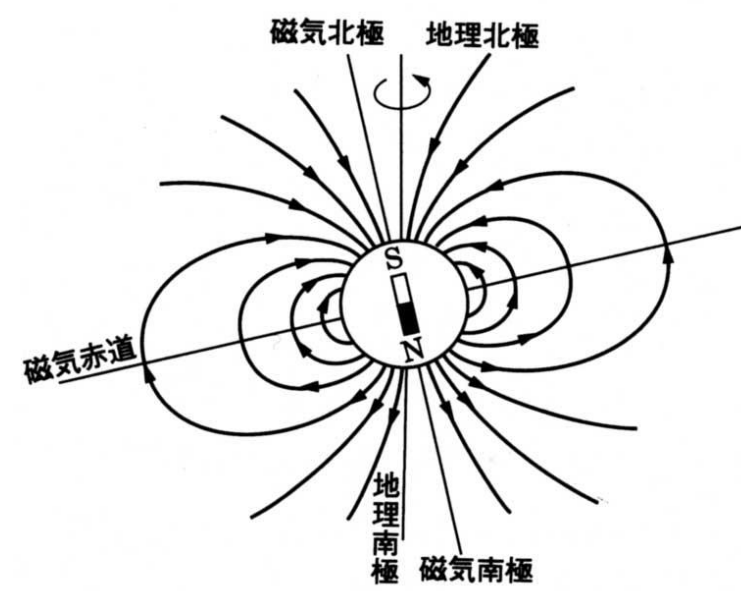
問題：下の図のように電池の両極を導線でショートさせたら、2 Aの電流が流れた。導線から 1 cm 離れた場所の磁場 B の強さはいくらか？

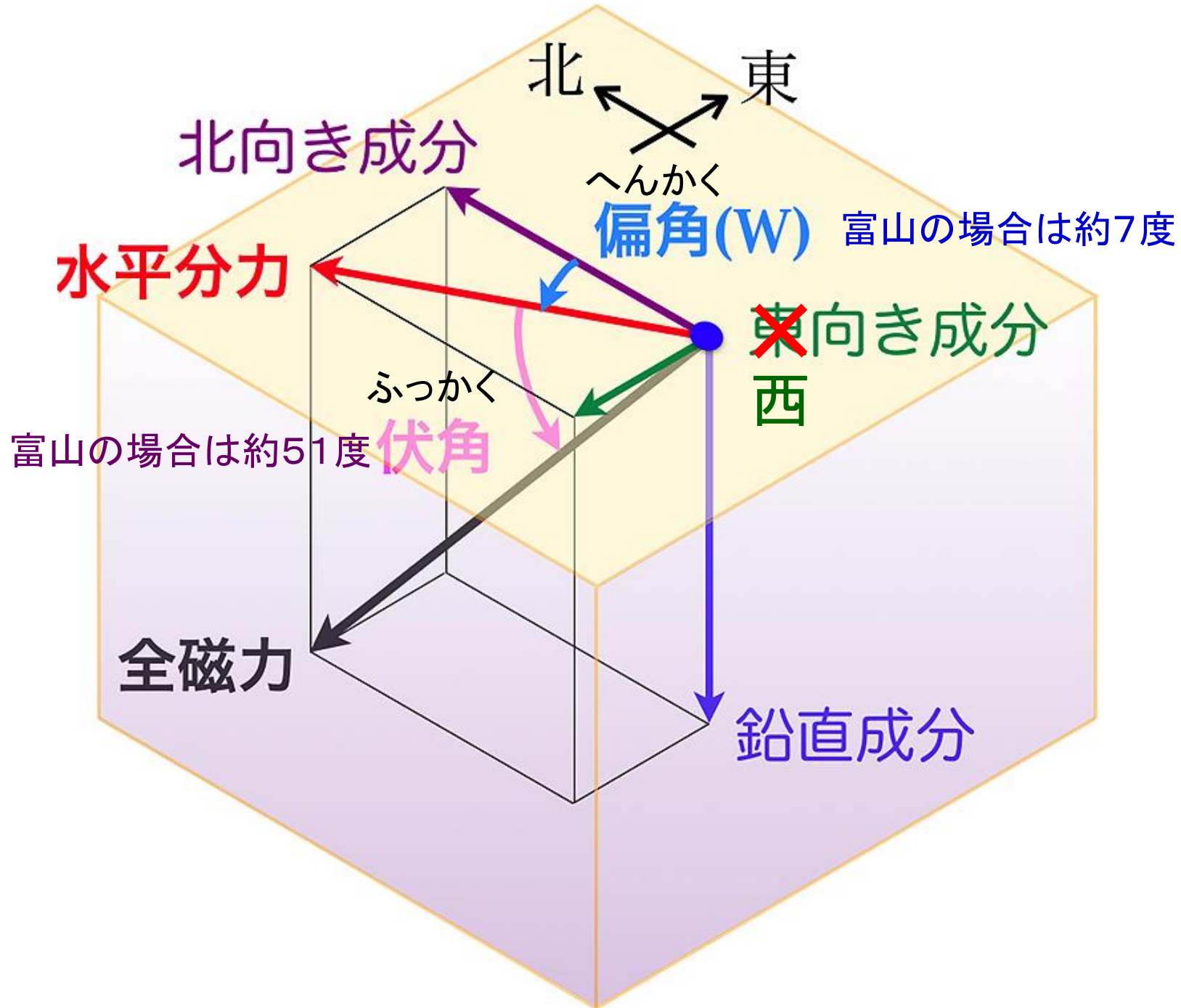


$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 2}{2\pi \times 0.01} = 4 \times 10^{-5} \text{ [T]}$$

導線の長さに対して
導線からの距離が
十分に小さければ、
長い直線電流の式が
近似的に使える。

参考： 富山の地磁気
磁場の強さ： $4.8 \times 10^{-5} \text{ T}$
伏角（水平となす角）： 51°
ふっかく





磁場の重ね合わせの原理

E_1 : 電荷 Q_1 の作る電場

E_2 : 電荷 Q_2 の作る電場

B_1 : 電流 I_1 の作る磁場

B_2 : 電流 I_2 の作る磁場

E : 電荷 Q_1 と電荷 Q_2 が作る電場

B : 電流 I_1 と電流 I_2 が作る磁場

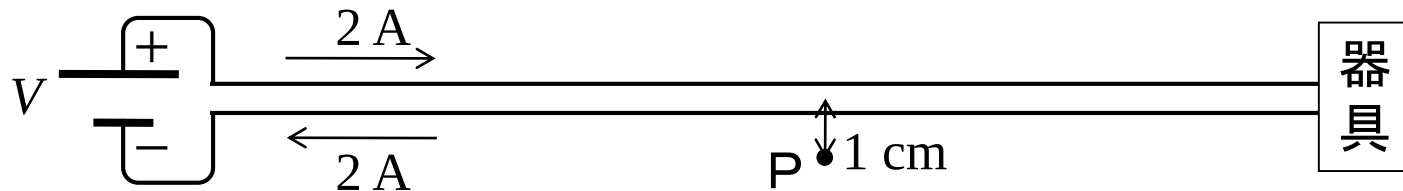
$$E = E_1 + E_2$$

$$B = B_1 + B_2$$

例: ⑭の問題で地磁気が存在する場合は
電流の作る磁場と地磁気の(ベクトルの)足し算になる。

地磁気の発生原因はよくわかっていないが、
地球の内部(核)を流れる電流が原因と考えられている。

問題：下の図のように電気器具の電源コードは2つの導線（往復）が接近している ⑬
（間隔 1 mm）。⑭の問題と同じく電流が 2 A 流れているときコードの中心から 1 cm
離れた点Pの磁場 B の強さと向きを求めよ。



実際は交流が多いが
この問題では直流と考える。
ノートPC等はアダプタ
から先は直流

＋側の導線との距離：10.5 mm
－側の導線との距離：9.5 mm

$d = 0.95 \text{ cm} : B = 4.21 \times 10^{-5} \text{ T}$ (紙面の奥から手前) ●

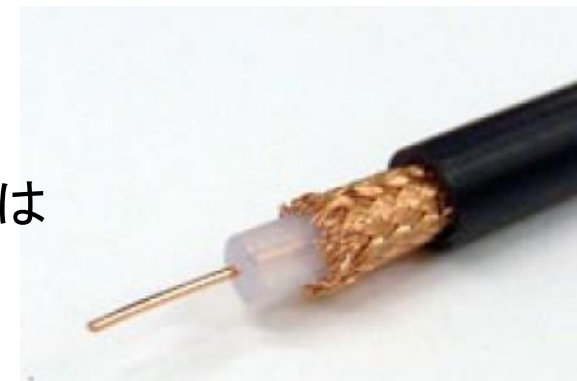
$d = 1.05 \text{ cm} : B = 3.81 \times 10^{-5} \text{ T}$ (紙面の手前から奥) ⊗

足すと： $B = 4.0 \times 10^{-6} \text{ T}$ (紙面の奥から手前) ●

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ [T} \cdot \text{m/A]}$$

上の図のように、向きの異なる電流が接近していると、磁場は打ち消し合い外部に生じる磁場は小さくなる。
右の同軸ケーブルは外部に生じる磁場はほぼゼロになる。



(任意の形の電流のつくる磁場)

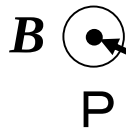
定常電流 I が流れている導線の微小部分 Δs が、
そこから距離 r (相対位置ベクトル $\mathbf{r}$) の点 P に作る磁場 $\Delta \mathbf{B}$

ビオ-サバールの法則

$$\Delta B = \frac{\mu_0 I \Delta s \sin \theta}{4 \pi r^2}$$

方向: $\Delta s, r$ に垂直
向き: 右ネジの規則

θ は電流の向き Δs と r のなす角



r

θ

$$\Delta \mathbf{B} = \frac{\mu_0 I \Delta \mathbf{s} \times \mathbf{r}}{4 \pi r^3}$$

(ベクトル表示)

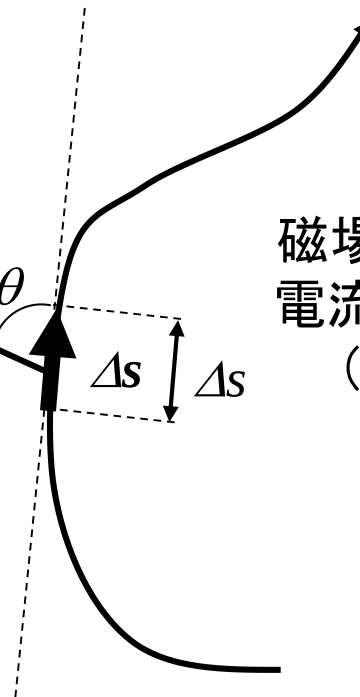
$$|\Delta \mathbf{s} \times \mathbf{r}| = |\Delta \mathbf{s}| |\mathbf{r}| \sin \theta$$

$$|\Delta \mathbf{s} \times \mathbf{r}| = \Delta s r \sin \theta$$

電流 I

右ねじの規則

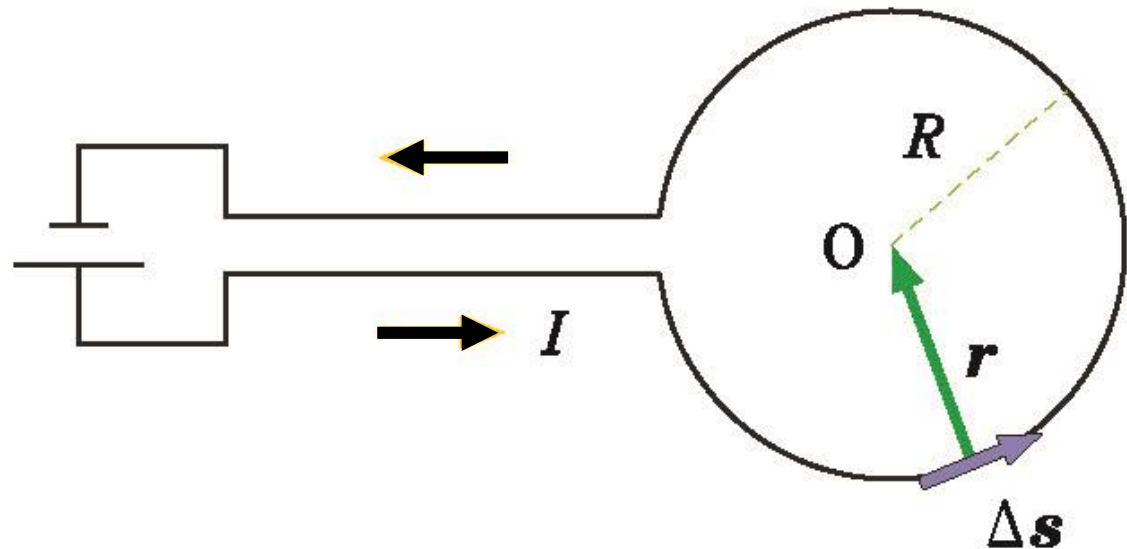
磁場の向き: 右ねじの回る向き
電流の向き: 右ねじの進む向き
(直線電流の場合と同じ)



半径 R の円電流 I が円の中心に作る磁場

ビオ-サバルの法則

$$\Delta B = \frac{\mu_0 I \Delta s \sin \theta}{4 \pi r^2}$$



導線の微小部分 Δs が円の中心につくる磁場

$$\Delta B = \frac{\mu_0 I \Delta s}{4 \pi r^2} \quad (\sin \theta = 1) \quad \theta \text{ は } \Delta s \text{ と } r \text{ のなす角}$$

$$B = \Sigma \Delta B = \frac{\mu_0 I}{4 \pi R^2} \Sigma \Delta s, \quad \Sigma \Delta s = 2 \pi R \text{ (円周の長さ) なので}$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{4 \pi R^2} 2 \pi R = \frac{\mu_0 I}{2 R}$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2 R}$$

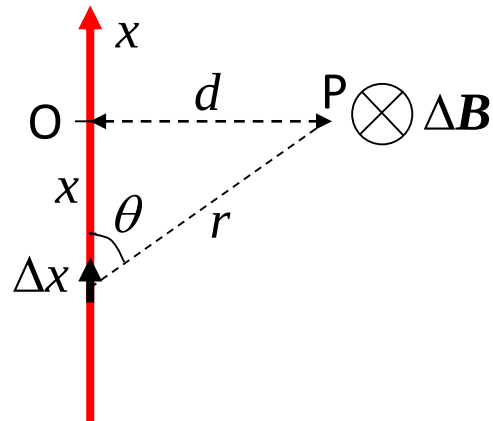
図の場合向きは？

紙面の奥から手前

磁場 B は電流 I に比例し半径 R に反比例

問題: ビオ-サバルの法則を用いて、直線電流の作る磁場の式 $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d}$ を導け。⑬

電流 I x 軸は、電流 I 上にとる。



ヒント: $\int \frac{dx}{(x^2+a^2)^{3/2}} = \frac{x}{a^2(x^2+a^2)^{1/2}} + C$

$$B = \frac{\mu_0 I d}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dx}{(x^2+d^2)^{3/2}}$$

$$B = \frac{\mu_0 I d}{4\pi} \left[\frac{x}{d^2(x^2+d^2)^{1/2}} \right]_{-\infty}^{+\infty}$$

$$B = \frac{\mu_0 I d}{4\pi} \left(\frac{1}{d^2} - \frac{-1}{d^2} \right)$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d}$$

微小部分 Δx に流れている
電流 I が点 P に作る磁場 ΔB は

$$\sin \theta = \frac{d}{r} = \frac{d}{(x^2+d^2)^{1/2}}$$



$$\Delta B = \frac{\mu_0 I \Delta s \sin \theta}{4\pi r^2} = \frac{\mu_0 I d \Delta x}{4\pi (x^2+d^2)^{3/2}}$$

(x²+d²)

円電流 I (半径 R) の中心軸上の点の磁場①

(ソレノイドの磁場を計算する下準備)

問題: 右の図のような円電流 I の微小部分 Δs が図の点 P につくる磁場 ΔB の大きさを求めよ。図中の記号を用いてよい。

ビオ-サバルの法則

$$\Delta B = \frac{\mu_0 I \Delta s \sin \theta}{4\pi r^2}$$

$$\sin \theta = 1, r = (R^2 + x^2)^{1/2}$$

$$\Delta B = \frac{\mu_0 I \Delta s}{4\pi (R^2 + x^2)}$$

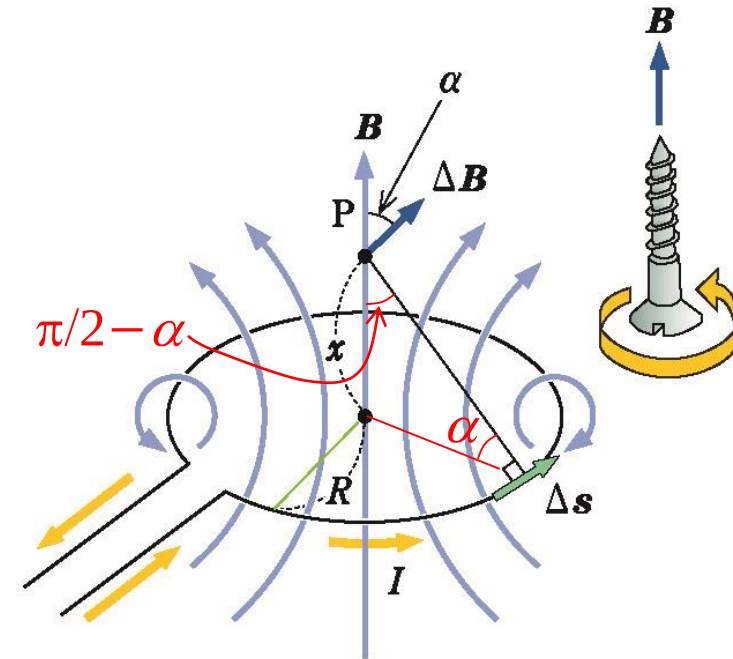


図20.25

円電流 I (半径 R) の中心軸上の点の磁場②

②1

$$\Delta B = \frac{\mu_0 I \Delta s}{4\pi (R^2 + x^2)}$$

ΔB の中心軸に垂直な成分は打ち消し合うので、
中心軸方向成分だけ考える。

問題：中心軸方向成分： $\Delta B \cos \alpha$ を求めよ。
図中の記号を用いてよい。

$$\cos \alpha = \frac{R}{(R^2 + x^2)^{1/2}}$$

$$\Delta B \cos \alpha = \frac{\mu_0 I R \Delta s}{4\pi (R^2 + x^2)^{3/2}}$$

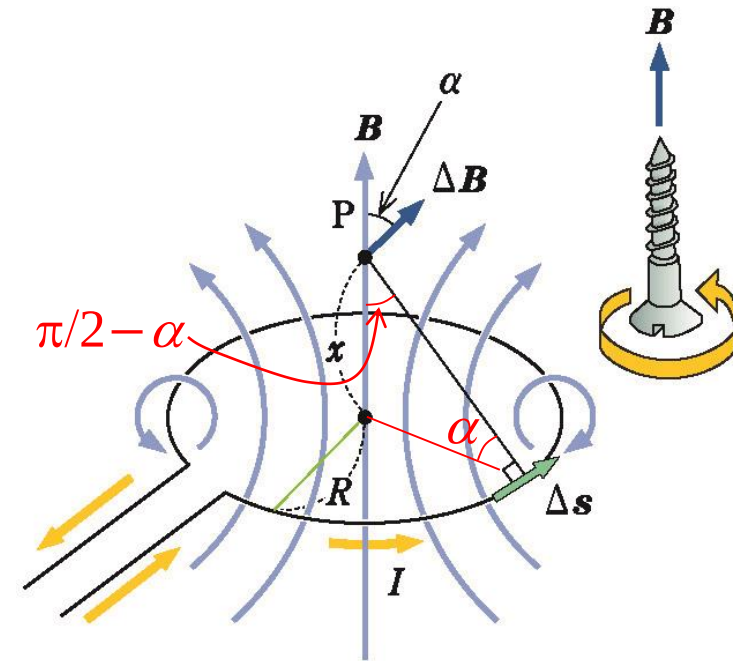


図20.25

円電流 I (半径 R) の中心軸上の点の磁場③

22

$$\text{中心軸方向成分: } \Delta B \cos \alpha = \frac{\mu_0 I R \Delta s}{4\pi (R^2 + x^2)^{3/2}}$$

問題: 円電流 I が点 P につくる磁場 B の大きさを求めよ。

$$B = \Sigma(\Delta B \cos \alpha) = \frac{\mu_0 I R}{4\pi (R^2 + x^2)^{3/2}} \Sigma \Delta s,$$

$$\Sigma \Delta s = 2\pi R$$

$$B = \frac{\mu_0 I R^2}{2 (R^2 + x^2)^{3/2}}$$

問題: $x = 0$ のときの B を求めよ。

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

= 円電流のつくる磁場⑱

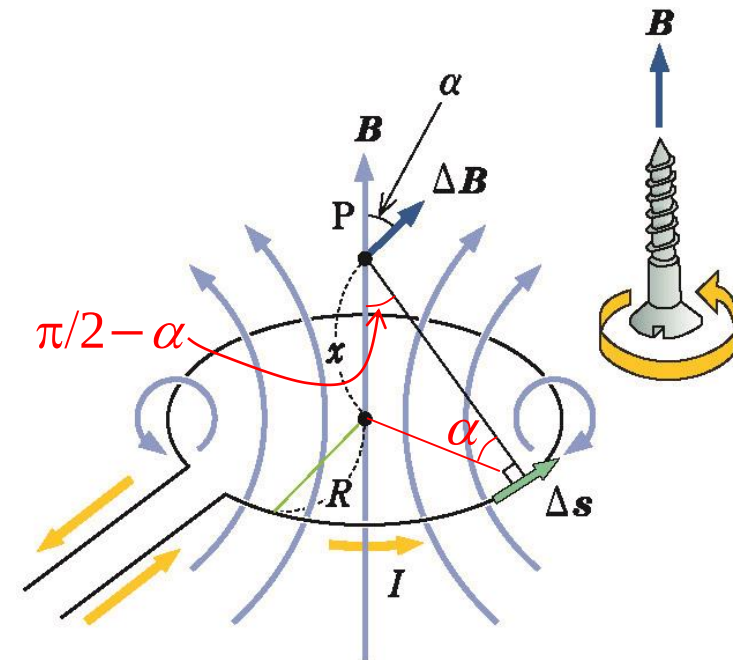


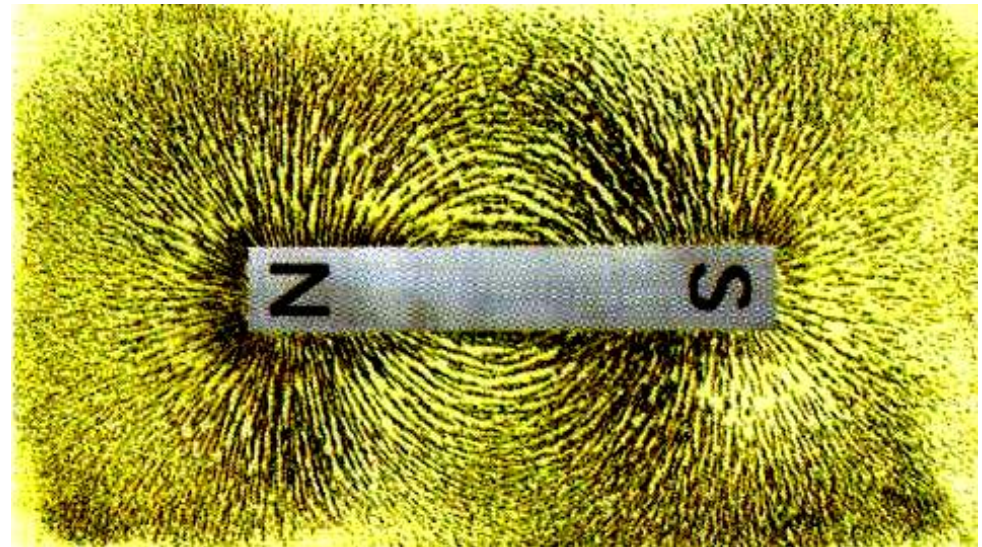
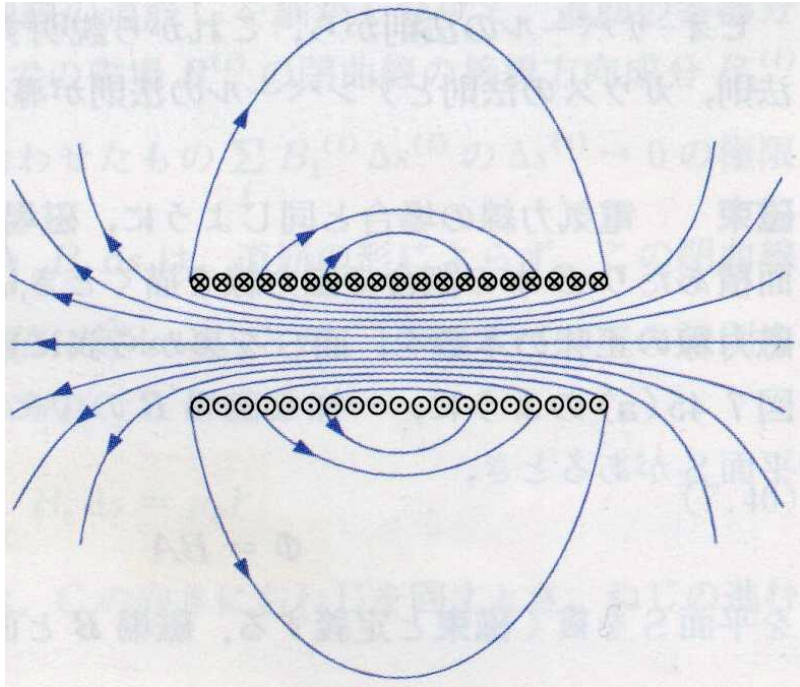
図20.25

長いソレノイドを流れる電流が作る磁場

ソレノイド
ソレノイドコイル

: 絶縁した導線を密に円筒状に巻いたもの

ソレノイドに電流を流したときに生じる磁場 = 多数の円電流の重ね合わせ



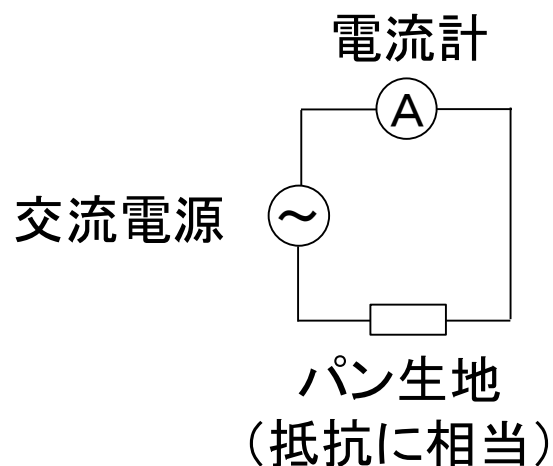
ソレノイドの外部に生じる磁場は、棒磁石の外部の磁場に似ている。
(理由は後で説明する)。

電気パンの実験

ジュール熱でパン(ホットケーキ)をつくる

ステンレスの電極を
コンセント(100 V)に接続

回路図



交流は21章
今は直流と
考えて下さい。



牛乳パックの下の部分

スタート時刻: _____ 電流: _____ 電力: _____

終了時刻: _____ 電流: _____ 電力: _____

問題: 消費した電力量: