

磁気探査技師資格取得講習会

— 電磁気関係 —

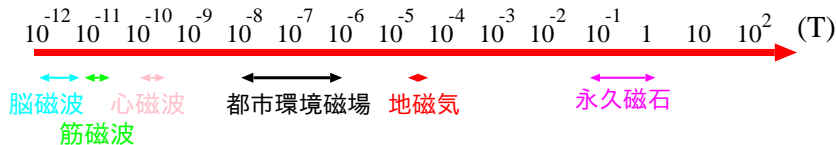
山本 健一 (琉球大学 工学部)

yamamoto@eee.u-ryukyu.ac.jp

2023 年度

磁気のスケール

磁界の強さ



$$10^{-1} = 0.1$$

$$10^{-2} = 0.01$$

$$10^{-3} = 0.001$$

$$10^{-4} = 0.0001$$

$$10^{-5} = 0.00001$$

$$10^{-6} = 0.000001$$

$$10^{-7} = 0.0000001$$

磁気的な材料の分類

$$B = \mu H = \mu_r \mu_0 H = \mu_0 H + J, \quad J = \chi H = \chi_r \mu_0 H$$

● B : 磁束密度, H : 磁界, J : 磁化

● μ : 透磁率, $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$: 比透磁率

真空の透磁率 ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ [H/m])

● χ : 磁化率, $\chi_r = \frac{\chi}{\mu_0}$: 比磁化率

- 磁性材料 $\chi \gg 0$ (磁石に良く反応する)
 - 強磁性体 (フェロ磁性)
 - フェリ磁性体
- 非磁性材料 $\chi \approx 0$ (磁石にほとんど反応しない)
 - 常磁性 ($\chi > 0$)
 - 反強磁性 ($\chi > 0$)
 - 反磁性 ($\chi < 0$)

磁気的な材料の分類

I _a										0										
1 H □(H ₂) _l	II _a										III _b					IV _b	V _b	VI _b	VII _b	2 He (He) _l
3 Li ○	4 Be ○											5 B □	6 C □	7 N □(N ₂) _l	8 O ○(O ₂) _l	9 F □	10 Ne □(Ne) _l			
11 Na ○	12 Mg ○											13 Al ▽	14 Si □	15 P □	16 S □	17 Cl □(Cl ₂) _l	18 Ar □			
		III _a	IV _a	V _a	VI _a	VII _a	VIII			I _b	II _b									
19 K ○	20 Ca ○	21 Sc ○	22 Ti ▽	23 V ▽	24 Cr ⊗	25 Mn ⊗	26 Fe ●	27 Co ●	28 Ni ●	29 Cu □	30 Zn ▽	31 Ga ▽	32 Ge □	33 As □	34 Se □	35 Br □	36 Kr □			
37 Rb ○	38 Sr ○	39 Y ○	40 Zn ▽	41 Nb ▽	42 Mo ▽	43 Tc ▽	44 Ru ▽	45 Rh ○	46 Pd ○	47 Ag □	48 Cd ▽	49 In ▽	50 Sn β α ▽	51 Sb □	52 Te □	53 I □	54 Xe □			
55 Cs ○	56 Ba ○			72 Hf ○	73 Ta ▽	74 W ▽	75 Re ▽	76 Os ▽	77 Ir ▽	78 Pt ○	79 Au □	80 Hg ▽	81 Tl ▽	82 Pb ▽	83 Bi □	84 Po □	85 At □	86 Rn □		
87 Fr □	88 Ra □	57 La ▽	58 Ce ⊗	59 Pr ⊗	60 Nd ⊗	61 Pm ↗	62 Sm ⊗	63 Eu ⊗	64 Gd ●	65 Tb ●	66 Dy ●	67 Ho ●	68 Er ●	69 Tm ●	70 Yb ○	71 Lu ○				
		89 Ac ▽	90 Th ▽	91 Pa ▽	92 U ▽	93 Np □	94 Pu □	95 Am □	96 Cm □	97 Bk □	98 Cf □	99 Es □	100 Fm □	101 Mv □	102 No □	103 Lr □				

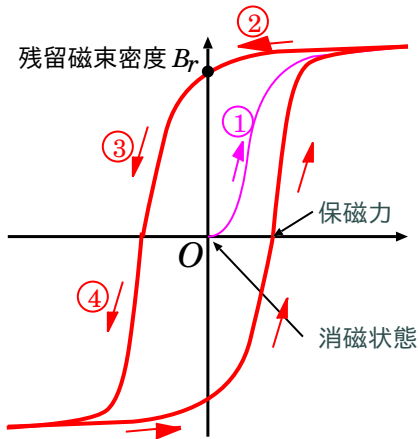
○ 常磁性
 □ 反磁性
 ● 強磁性
 ⊗ 反強磁性 (らせん磁性)
 ▽ 超伝導

↗ 低温から高温へ
 { 遷移金属
 希土類金属
 アクチノイド金属
 ()_l 液体状態における磁性

(出典) 近角他: 磁性体ハンドブック (朝倉)

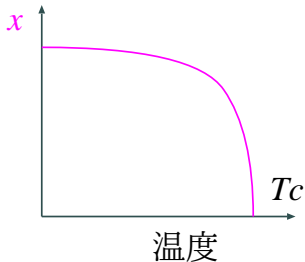
磁性材料の特徴

ヒステリシス



温度による 磁化率 χ , 飽和磁化 (J) の変化

$$(B = \mu H = \mu_0 H + \chi H)$$

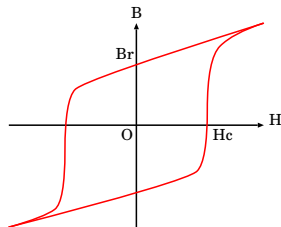


T_c : キュリー点

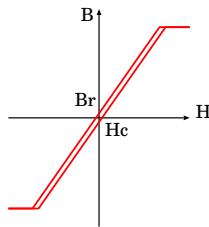
磁性材料の特徴

- 飽和磁化, 飽和磁束密度: J は上限がある.
- ヒステリシスにより磁気損失が生ずる.
(エネルギーを熱として放出)
- 残留磁化, 残留磁束密度: 磁界を取り去っても, 磁化, 磁束密度が残る. 磁気探査では砲弾などの B_r を探す
- 熱消磁, 交流消磁: BH 曲線の原点の状態に戻す
- 磁気遮蔽: パーマロイや電磁鋼板など透磁率の高い材料で囲むと内部に磁束密度が入らない

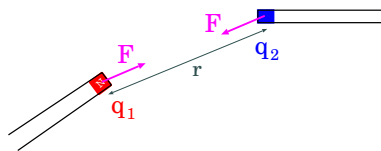
硬質磁性材料



軟質磁性材料



磁極間に働く力と磁界



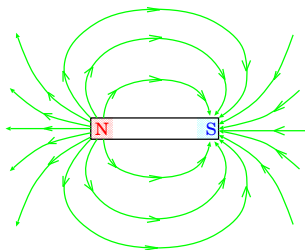
- 磁極 q_1 [Wb] と q_2 [Wb] の間 (距離 r [m]) に働く力

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\mu_0 r^2} \quad [\text{N}]$$

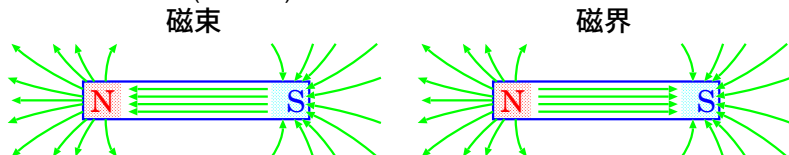
- 磁極 q_1 が距離 r の場所につくる磁界と力

$$H = \frac{q_1}{4\pi\mu_0 r^2} \quad [\text{A/m}], \quad F = q_2 H \quad [\text{N}]$$

磁力線と磁場

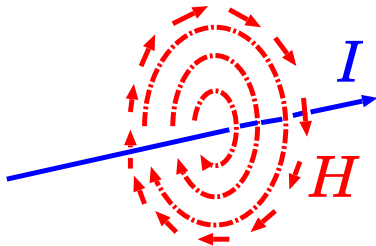


- q [Wb] の磁極からは q 本の磁力線
- 磁場は磁力線の接線方向
- 磁界は, ベクトル (大きさと方向を持つ)
- 材料内部の磁界 (反磁界) \Rightarrow 有効磁界の減少



電流で磁界をつくる

- アンペールの右ネジの法則 ... $\text{rot}H = I$



$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad [\text{A/m}]$$

r : 電流 (電線) からの距離

(例) 電車の架線など影響

電流で磁界をつくる

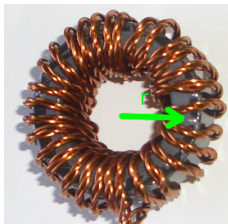
コイルに流す電流を I [A] とすると,

- 無限に長いソレノイドでの磁界 … $H = n_0 I$ [A/m]
(n_0 は 1m あたりの巻数)



長さ L , 半径 a のソレノイド中央での磁界: $H = \frac{n_0 I L}{2 \sqrt{a^2 + (L/2)^2}}$

- トロイダルコア … $H = \frac{NI}{2\pi r}$ [A/m]
平均半径 r のドーナツ型鉄心にコイルを N 回巻く



磁気の関係式と単位

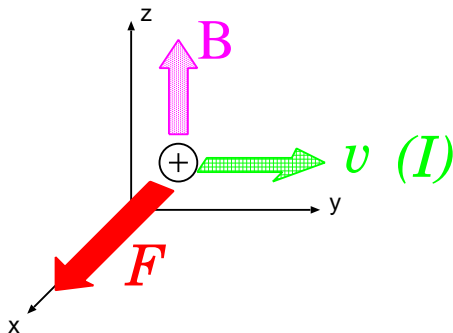
物理量	関係式	単位
磁束 ϕ		Wb(ウェーバー)
磁束密度 B	$B = \frac{\phi}{S}$	T (テスラ) = $\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$
磁界 H		A/m(アンペア毎メートル)
透磁率 μ	$\mu = \frac{B}{H}$	H/m(ヘンリー毎メートル) = $\frac{\text{Wb}}{\text{A}\cdot\text{m}}$
比透磁率 μ_r	$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$	(無次元)
磁化 J	$B = \mu_0 H + J$	T
磁化率 χ	$\chi = \frac{J}{H}$	H/m
比磁化率 χ_r	$\chi_r = \frac{\chi}{\mu_0}$	(無次元)

(Kennelly 単位系)

動く電荷が受ける力

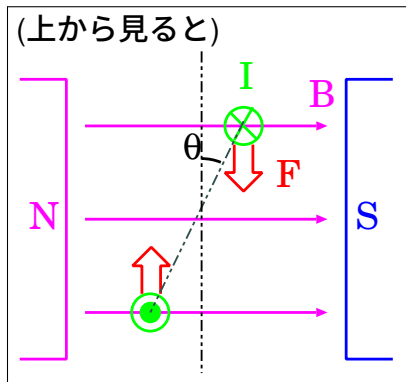
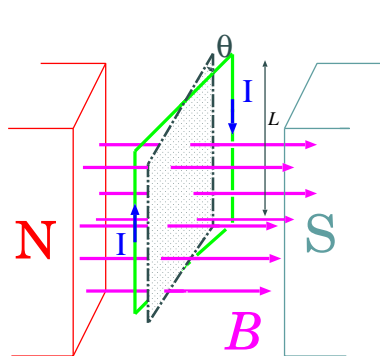
- **ローレンツ力** … 電荷 q [C] は磁束密度 B [T] 中を速度 v [m/s] で移動すると力を受ける

$$F = q(v \times B) \quad [\text{N}]$$



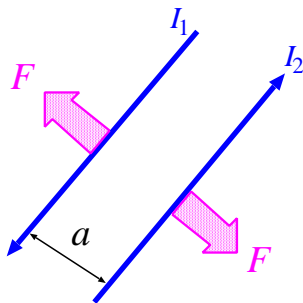
- **フレミングの左手の法則**
… 磁場中 (B) で電流 (I) が受ける力 (F)

磁界中の電流にはたらく力



長さ L の導体が受ける力: $F = IBL$
(方向はフレミングの左手の法則)

平行電流のつくる力



導線 1m あたりにはたらく力

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} = \frac{(2 \times 10^{-7}) I_1 I_2}{a}$$

- 電流が互いに同方向: 吸引力
- 電流が互いに逆向き: 反発力
- (例題) $I_1 = I_2 = 1\text{A}$, $a = 1\text{m}$ のとき, 各導線に働く力の大きさは $F = 2.00 \times 10^{-7}\text{N} \cong 2.04 \times 10^{-8}\text{kgf}$

磁気双極子

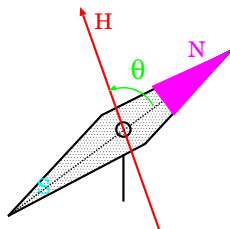
- 磁気モーメント... $m = q_m L$ [Wb · m]



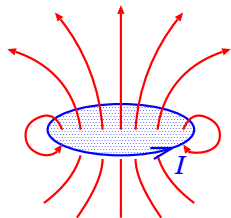
- 磁場 H の中に 磁気双極子 m が置かれると...

- エネルギー... $E = -m \cdot H = -mH \cos \theta$ [J]
- トルク (回転力)... $\tau = m \times H$ [N · m]

$$|\tau| = mH \sin \theta \quad [\text{N} \cdot \text{m}]$$



磁気双極子

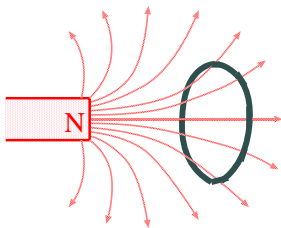


- 面積 S [m^2] の円電流 I [A] のつくる磁気双極子の大きさ

$$m = \mu_0 IS \quad [\text{Wb} \cdot \text{m}]$$

- 磁気モーメントの向きは
「右ネジ」の進行方向

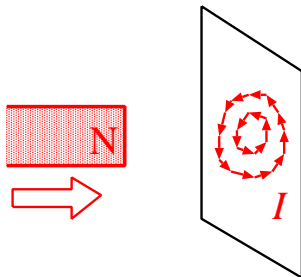
コイル (巻線) に発生する起電力



$$V = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(NSB)}{dt} = -\mu NS \frac{dH}{dt}$$

- 鎖交磁束の時間変化に比例 (ファラデーの法則)
- 磁束変化を妨げる方向に (レンツの法則)
- 鎖交磁束 $\Phi = N\phi$

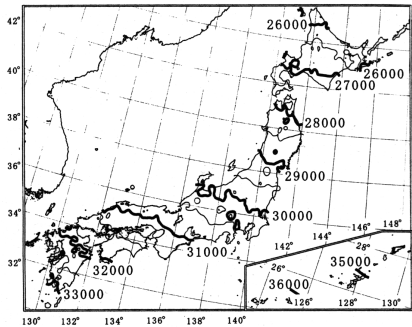
渦電流



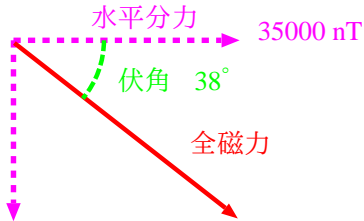
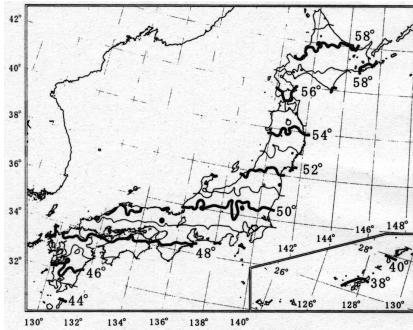
- 磁束の変化を妨げる方向に, 導体 (金属) に電流が流れる.
- (応用) 金属探知機, 渦電流ブレーキ, 電力計, 硬貨の判別 など

地磁気

水平分力

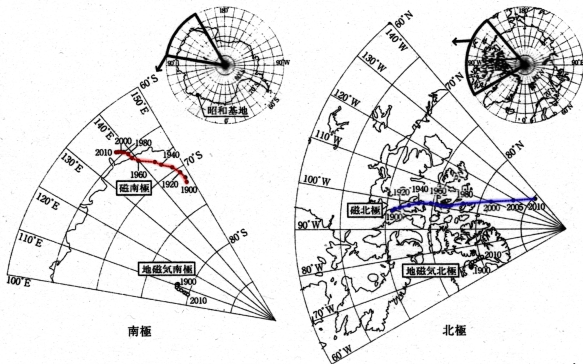


伏角

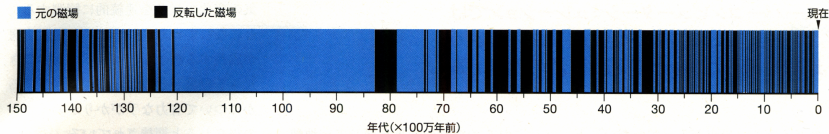


(出典) 理科年表 (丸善)

地磁気



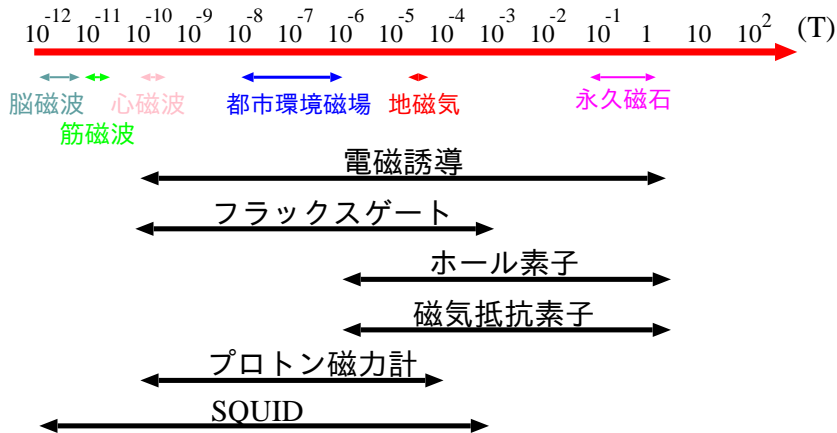
(出典) 理科年表 (丸善)



(出典) 日経サイエンス (2005/7)

磁気の検出方法

磁界の強さ



(磁気工学ハンドブック (朝倉) 他よりデータ引用)

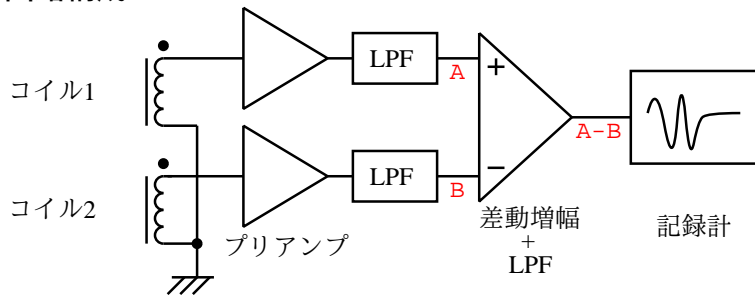
両コイル型磁気傾度計

地磁気の中で、
地磁気よりも小さな磁界を測定するために

- **高感度** (小さな信号を見逃さない)
 - 巻線数を大きく
 - 磁束を集める
高透磁率軟磁性材料 (パーマロイ)
 - アンプで増幅
 - フィルタで信号のみを抽出
- **2コイルの使用・バランス調整**
(地磁気の影響を取り除く)

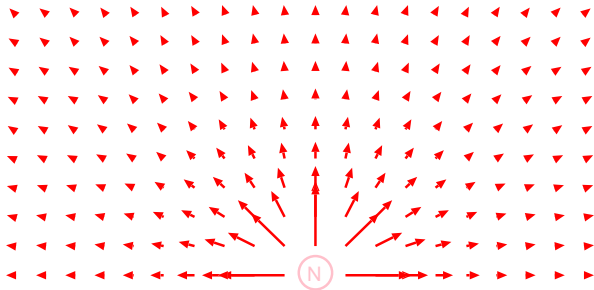
両コイル型磁気傾度計

回路構成



- アンプで信号 (約 0.3Hz) を増幅し, 記録計に出力
- 地磁気による信号は相殺
- ノイズは低域通過フィルター (LPF) でカット

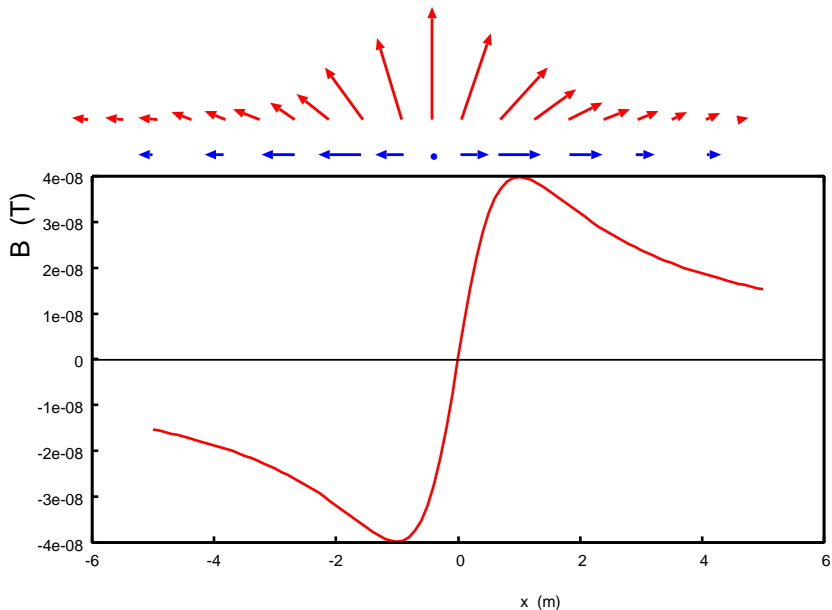
単極のつくる磁場分布



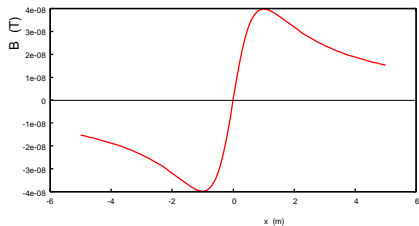
$$B = \frac{q}{4\pi r^2}(\text{T})$$

(方向は磁極から放射状)

単極のつくる磁場 (水平移動)

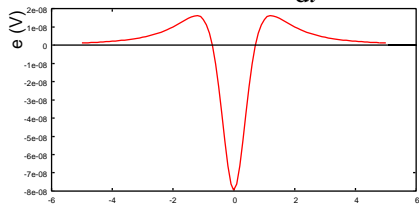


単極による 1 コイルの出力電圧



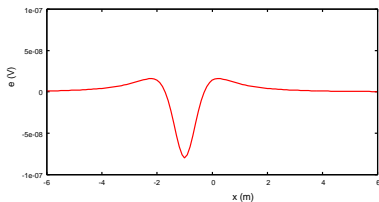
出力波形 (誘導電圧)

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -NS\mu_r \frac{dB}{dx} \frac{dx}{dt} = -NS\mu_r v \frac{dB}{dx}$$

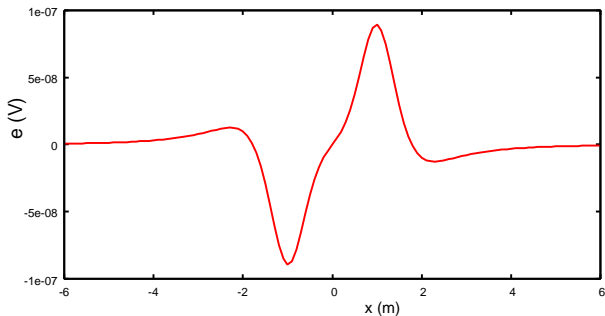
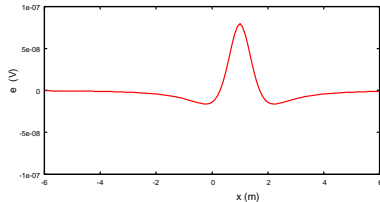


両コイル型磁気傾度計の出力

コイル 1

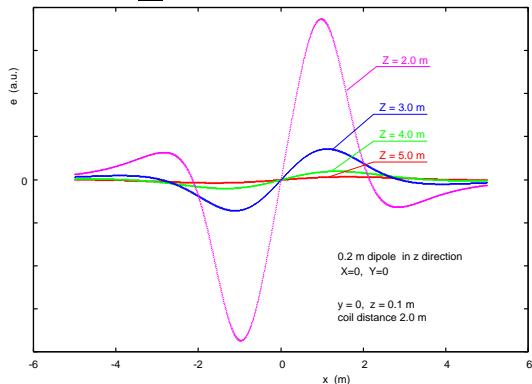
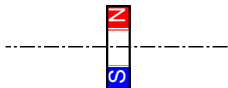


コイル 2



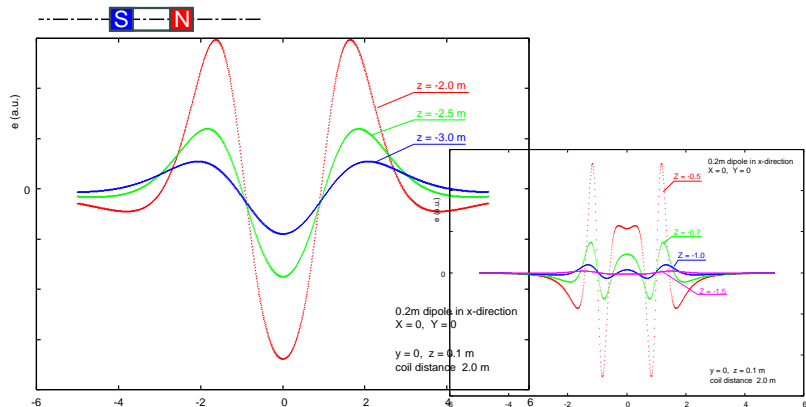
両コイル型磁気傾度計の出力

双極 (縦置き)



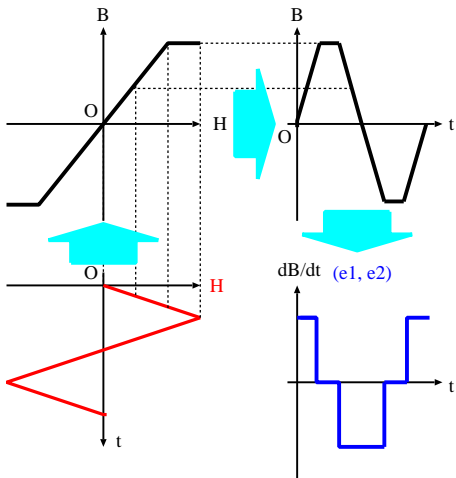
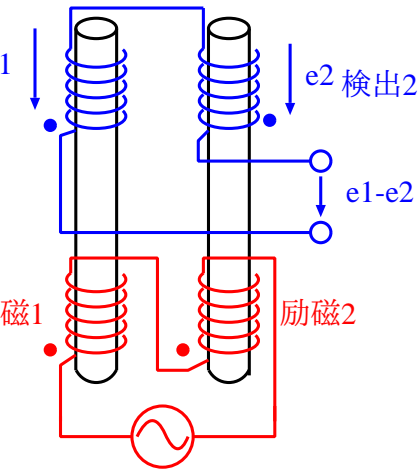
両コイル型磁気傾度計の出力

双極 (横置き)



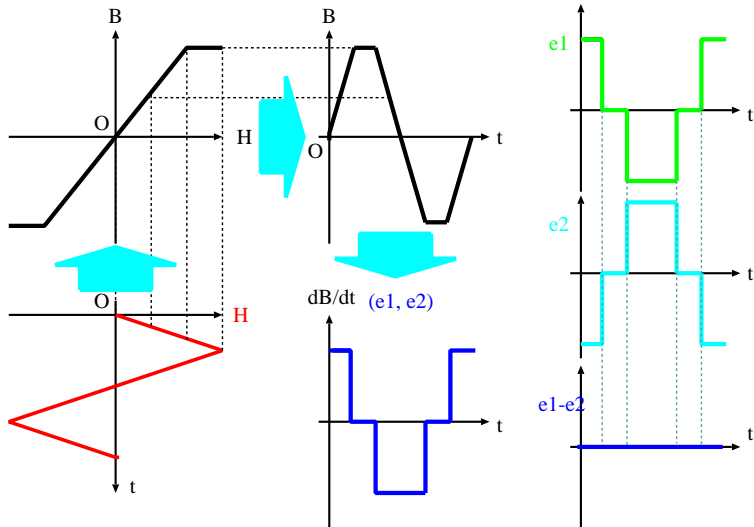
フラックスゲート型磁力計

..... 軟質磁性体の「高透磁率」と「可飽和性」



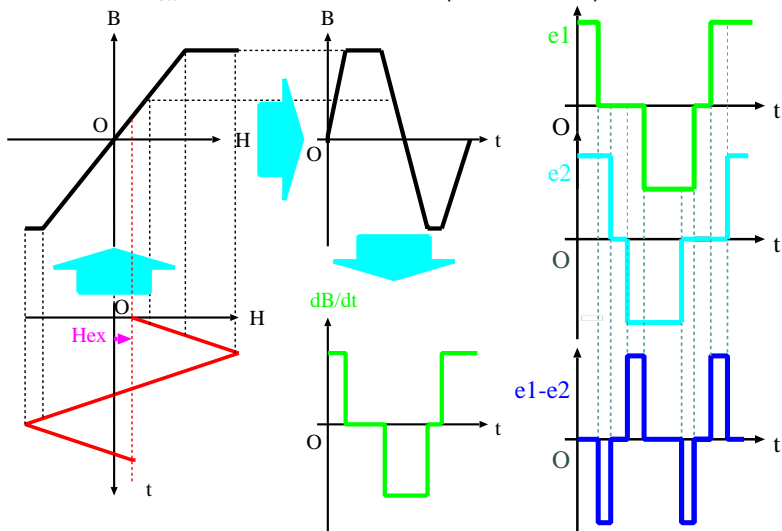
フラックスゲート型磁力計

外部磁界 H_{ex} なし \Rightarrow 出力なし ($e_1 - e_2 = 0$)



フラックスゲート型磁力計

外部磁界 H_{ex} あり \Rightarrow 出力あり ($e_1 - e_2 \neq 0$)

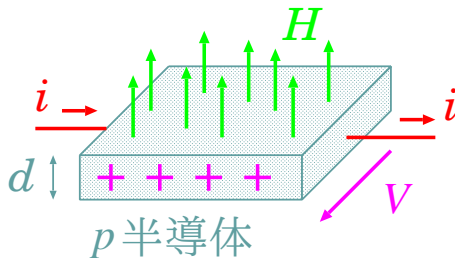


フラックスゲート型磁力計

- 高透磁率材料 (パーマロイ細線/薄膜など)
- 交流 (高周波) で励磁
- 外部磁界 (被測定磁界) により発生する, 出力電圧の偶数次高調波成分を利用

- 一般に, センサーの方向の磁界成分を計測
- 種々のコイル (センサヘッド) 形状あり
- サーボ機構を利用して感度を向上させたシステムもあり

ホール効果 (ガウスメータ)



$$V = R_H \frac{i(\mu_0 H)}{d}$$

- ホール係数 R_H は使用する半導体で異なる
- 交流/直流で使用可能
- R_H の温度係数が大きい

磁気抵抗 (MR) 効果

材料の電気抵抗が磁界によって変化

- 通常の抵抗変化率は数%
- 人工多層膜で数十%: 巨大磁気抵抗 (GMR) 効果
- 空間分解能が高い
- HDD-磁気ヘッドなど

プロトン磁力計

- プロトン (水素原子核) の磁気共鳴周波数が磁界強度に比例 (23.4874nT/Hz) することを利用
- 磁界の大きさ (絶対値) が精密に測定できる
- 全磁力計
- (応用例) 地磁気計測 (気象庁), MRI

光ポンピング磁力計

- 電子スピン共鳴を利用
- 全磁力計

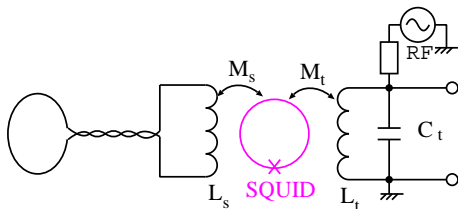
SQUID(超電導量子干渉素子)

Superconducting Quantum Interference Device

- 超電導現象を利用する

ジョセフソン素子と超電導リング

- 量子磁束 $\Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2.06783461 \times 10^{-15}[\text{Wb}]$ が分解能
- 極低温 (He) に冷却する必要あり, 装置が大規模
- (応用例) 生体磁気計測 (脳磁界, 心磁界)etc



磁気の単位換算

物理量	記号	SI と cgs の変換
磁荷	m	$1\text{Wb}_{(\text{ウェーバー})} = 10^8\text{MX}_{(\text{マクスウェル})}$
磁束	ϕ	同上
磁束密度	B	$1\text{T}_{(\text{テスラ})} = 10^4\text{G}_{(\text{ガウス})} = 10^9\gamma_{(\text{ガンマ})}$
磁化	J	同上
磁場	H	$1\text{A/m} = 4\pi \times 10^{-3}\text{Oe}_{(\text{エルステッド})}$

(参考)

- 国内の磁気探査では「G(NPG)」単位も使用されてきた
- G(NPG) と上記 G(cgs) とは全く別物で、注意が必要
- 換算: $1\text{G} \cdot \text{cm}^2(\text{NPG}) \cong 0.7\mu\text{Wb}$

- 磁気に関する物理現象と公式
- 地磁気
- 各種磁気測定方法
- 「両コイル型磁気傾度計」と「フラックスゲート型磁力計」の動作原理と出力波形

磁気探査の技能向上の一助となれば幸いです