抵抗の無視できる細い導線をすきまなく一様に N 回巻いて，断面図 S〔$\mathrm{m^2}$〕，長さ l〔m〕の中空のソレノイドを作り，真空中に置いた。起電力 E〔V〕の電池，抵抗値 R〔Ω〕の抵抗，電流計およびスイッチを図1に示すようにつないで，回路Aを作った。電池と電流計の内部抵抗は無視できるものとする。ソレノイドの長さ l〔m〕はその直径に比べて十分長いものとする。また，図中の矢印の方向からソレノイドを見ると，導線は右巻きに巻かれながら奥の方へ進んでいる。真空中の光の速さを c〔m/s〕，真空の誘電率を ε_0〔$\mathrm{C^2/N\cdot m^2}$〕，真空の透磁率を μ_0〔$\mathrm{N/A^2}$〕とする。

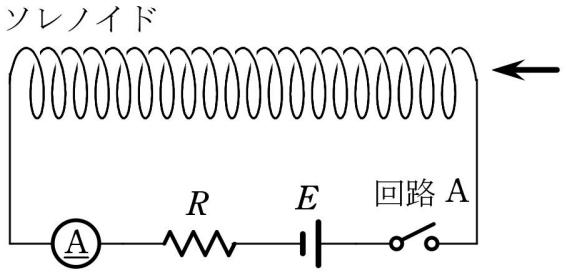


図1

(1) 次の文章中の［ア］～［ク］に最も適切な式または記号を，〔　　〕で囲まれた［a］と［b］に適切な単位の記号を入れよ。

スイッチを入れると，回路Aに流れる電流 I〔A〕はすぐに一定にはならないで，しだいに増加して一定値［ア］〔A〕に近づく。これは電磁誘導によってソレノイドに誘導起電力が生じ，電流の急激な変化を妨げるからである。誘導起電力の大きさはソレノイドの自己インダクタンスと電流の時間変化によって決まる。このソレノイドの自己インダクタンスを求めよう。ソレノイド内部の磁界(磁場)の強さは，$H=$［イ］〔［a］〕である。ソレノイド内部を通る磁束は，$\Phi=$［ウ］〔［b］〕である。時間 Δt〔s〕の間に流れる電流が ΔI〔A〕だけ変化し，ソレノイド内部を通る磁束は $\Delta\Phi$〔［b］〕だけ変化したとする。このとき，コイル1巻きあたりに生じる誘導起電力は　$v=-\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}=$［エ］$\dfrac{\Delta I}{\Delta t}$〔V〕　であり，ソレノイドの両端に生じる誘導起電力は $V=$［オ］$\dfrac{\Delta I}{\Delta t}$〔V〕　である。したがって，自己インダクタンスは，$L=$［カ］〔H〕　となる。

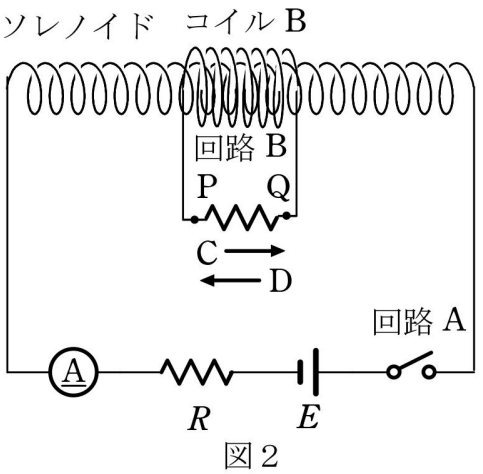


図2

スイッチを切って十分時間が経過したのち，図2に示すように，ソレノイドの外側に巻き数 M のコイルBを巻き，抵抗とつないで回路Bをつくった。コイルを巻く方向はソレノイドと同じである。再びスイッチを入れた。すると，コイルBにも誘導起電力が生じ，電流は図中に示した矢印の記号［キ］の方向へ流れた。これは相互誘導現象である。ソレノイドを貫く磁束とコイルBを貫く磁束はいつも同じなので，コイル1巻きあたりに生じる誘導起電力はどちらのコイル

に対しても同じである。時間 Δt〔s〕の間に流れる電流が ΔI〔A〕だけ変化したとすると，回路 B の抵抗の両端にかかる電圧は，

$V_B=$ [ク] $\dfrac{\Delta I}{\Delta t}$〔V〕　となる。

(2)　回路 A の電池を，電流の制御できる電源に交換し，図 3 に示す電流を流した。ただし，(1) で回路 A に流した電流の向きを正にとる。ソレノイド間の相互インダクタンスが 2 mH のとき，回路 B の P 点を基準として Q 点の電位をグラフにかけ。

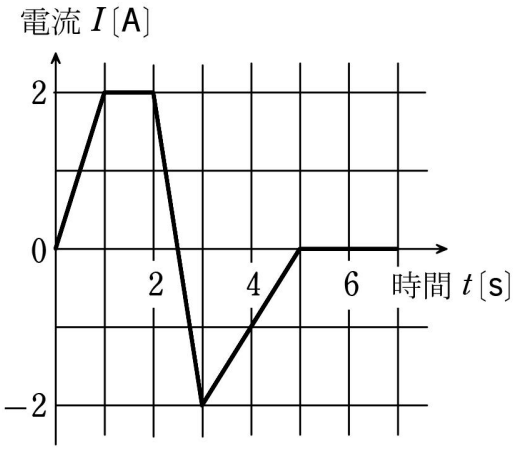


図 3

解説

(1)(ア)　オームの法則 $E=RI$ より　$I=\dfrac{E}{R}$

(イ), (a)　ソレノイド内部の磁界の強さ H は，コイルの単位長さあたりの巻き数を n とすると

$$H=nI=\frac{N}{l}I\ [\mathrm{A/m}]$$

(イ)　$\dfrac{N}{l}I$　　(a)　[A/m]

(ウ), (b)　$\Phi=BS=\mu_0HS=\dfrac{\mu_0NIS}{l}\ [\mathrm{Wb}]$

(ウ)　$\dfrac{\mu_0NIS}{l}$　　(b)　[Wb]

(エ)　$\Delta\Phi=\dfrac{\mu_0NS}{l}\cdot\Delta I$ より　$v=-\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}=-\dfrac{\mu_0NS}{l}\cdot\dfrac{\Delta I}{\Delta t}\ [\mathrm{V}]$

(オ)　$V=Nv=-\dfrac{\mu_0N^2S}{l}\cdot\dfrac{\Delta I}{\Delta t}\ [\mathrm{V}]$

(カ)　$V=-L\cdot\dfrac{\Delta I}{\Delta t}$ であるから　$L=\dfrac{\mu_0N^2S}{l}\ [\mathrm{H}]$

(キ)　スイッチを入れたとき，ソレノイド内部，および，コイルBを左向きに貫く磁束が増加する。よって，コイルBには，その変化を妨げる向きに誘導起電力が生じ，コイルの巻き方から，Q側が高電位となる。したがって，誘導電流はQからPへ，すなわち，Dの方向へ流れた。

(ク)　$V_{\mathrm{B}}=Mv=-\dfrac{\mu_0MNS}{l}\cdot\dfrac{\Delta I}{\Delta t}\ [\mathrm{V}]$

(2)　右図

$$V_{\mathrm{B}}=-M\cdot\frac{\Delta I}{\Delta t}\ [\mathrm{V}]$$

$0\leqq t\leqq 1$ (s) では

$$V_{\mathrm{B}}=-2\times10^{-3}\times\frac{2}{1}$$

$$=-4\times10^{-3}\ (\mathrm{V})$$

Q点の電位が 4×10^{-3} V だけ高い。

$1\leqq t\leqq 2$ (s) では $\Delta I=0$ (A) より　$V_{\mathrm{B}}=0$ (V)

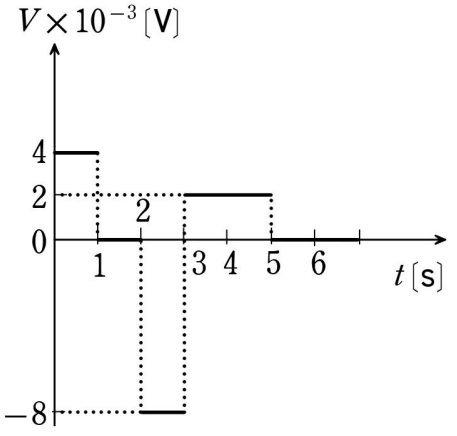
$2\leqq t\leqq 3$ (s) では

$$V_{\mathrm{B}}=-2\times10^{-3}\times\frac{-2-2}{1}=8\times10^{-3}\ (\mathrm{V})$$

Q点の電位が 8×10^{-3} V だけ低い。

$3\leqq t\leqq 5$ (s) では

$$V_{\mathrm{B}}=-2\times10^{-3}\times\frac{0-(-2)}{5-3}=-2\times10^{-3}\ (\mathrm{V})$$



Q 点の電位が 2×10^{-3} V だけ高い。

$5 \leqq t \leqq 7$ (s) では $\Delta I = 0$ (A) より　$V_B = 0$ (V)

したがって，P 点に対する Q 点の電位は，上図のグラフに示したように変化する。