十分長いソレノイド及び小さい三角形のループがある。

図 1 はソレノイドの横断図を示しており，三角形のループも同じ面内にある。

図 2 はその破線部分の拡大図である。

面 $x = 0$ から右側の領域（$x > 0$ の領域）は直流電流を流したソレノイドの内側であり，そこには +z 方向の平等磁界が存在するとする。その磁束密度を B [T] (B > 0) とする。

一方，左側領域 ($x < 0$) はソレノイドの外側であり磁界は零であるとする。

ここで, 三角形 PQR の抵抗器付き導体ループが xy 平面内を等速度 u [m/s]で $+x$ 方向に進み，ソレノイドの巻線の隙間から内側に侵入していく。

その際，導体ループの辺 QR は y 軸と平行を保っている。頂点 P が面 $x = 0$ を通過する時刻を T [s]とする。また，抵抗器の抵抗 r [Ω]は十分大きいものとする。

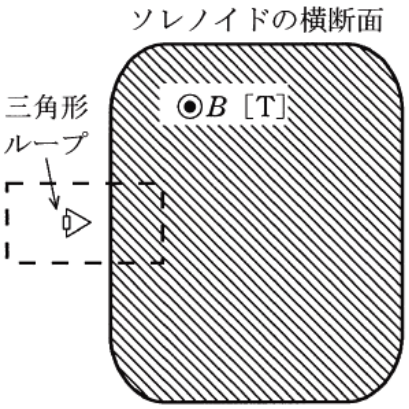


図 1

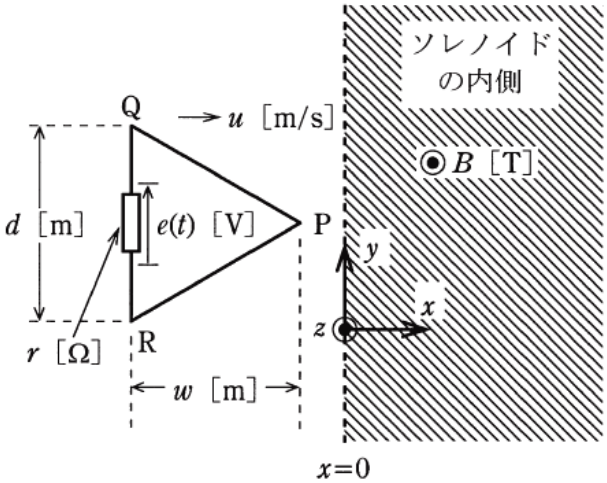
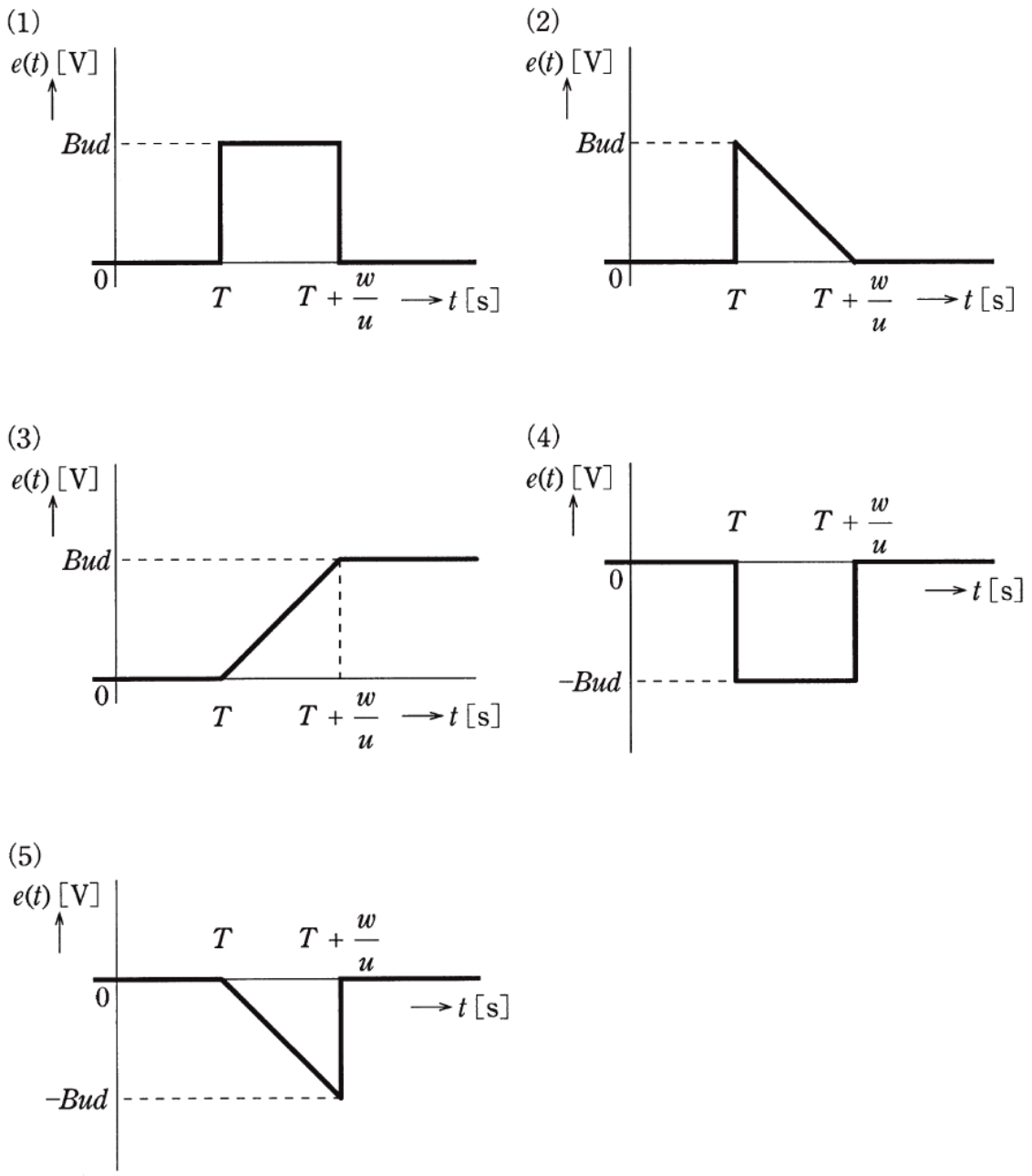


図 2

辺 QR の中央の抵抗器に時刻 t [s]に加わる誘導電圧を e (t) [V]とし，その符号は図中の矢印の向きを正と定義する。

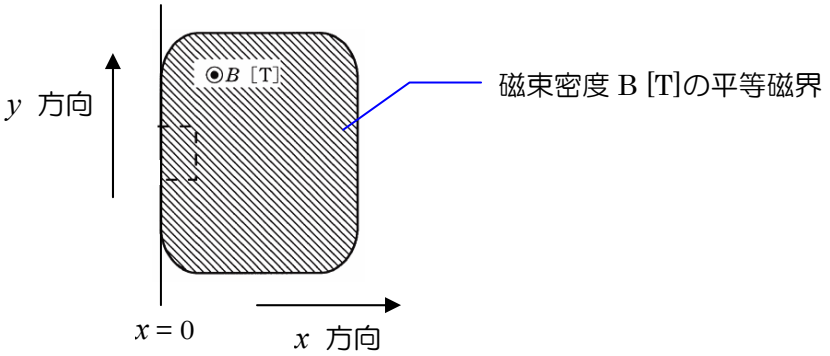
三角形ループがソレノイドの外側から内側へ入り込むときの e (t) を示す図として，最も近いものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。



解説

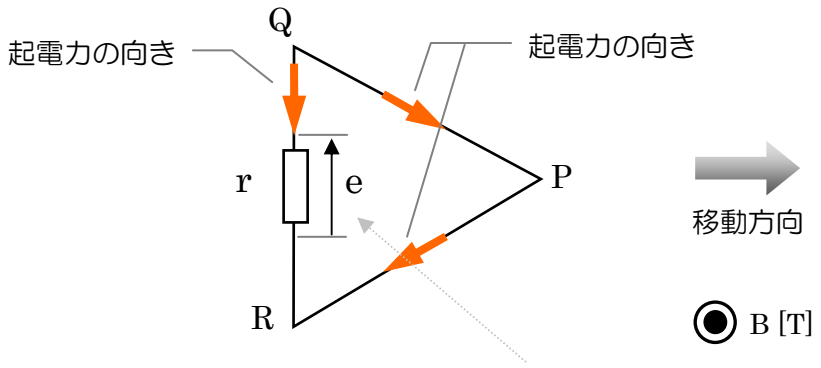
問題中に「図 1 はソレノイドの横断図を示しており、」とありますが、これは、斜線内は**平等磁界**になるということを意味していて、「ソレノイド」ということは気にしなくても OK です。

磁束の向き(z 方向)は、紙面(画面)の奥から手前方向で、磁束密度は B [T]になります。



三角形ループ(導体ループ)が平等磁界に侵入すると、磁界の影響を受けて三角形ループには起電力が発生します。(磁界中を導体が移動すると起電力が発生する)
「磁束の向き」「導体の移動方向」「起電力の発生する向き」の 3 つの要素が揃っているので、そのときの様子は、フレミング右手の法則により説明できます。
では、解いていきます。

磁束の向きは紙面(画面)の奥から手前、そして導体(三角形ループ)の移動方向は右方向(x 方向)になる。
「磁束の向き」と「導体の移動方向」をフレミング右手の法則に当てはめると、起電力 e の向きは上から下になる。
三角形で見ると Q−R では下方向(Q→R)、
Q−P、P−R では斜め下方向(Q→P、P→R)が起電力の向きになる。



問題の図では、抵抗 r の起電力 e の向きは上向きに定義されているので、実際の起電力の向きとは逆になる。
したがって起電力がマイナスの向きになっているグラフを選べばいいことになります。
起電力がマイナスの向きのグラフは、(4),(5) になる。

磁界中を直線導体が移動するときに発生する起電力の大きさを求める式

ここで、$e = Blv\sin\theta$ を使って考えてみます。
この式から、導体の長さ l が長くなれば起電力 e が大きくなることがわかります。
導体(三角形ループ)は時間とともに磁界の中に入っていくので、磁界の中に存在する導体部分は徐々に長くなっていく。
つまり、起電力が徐々に大きくなるグラフが正解になる、ということで、(2),(3),(5) が候補になります。

$$\begin{cases} \text{起電力がマイナスの向きのグラフは、(4),(5)} \\ \text{起電力が徐々に大きくなるグラフは、(2),(3),(5)} \end{cases}$$

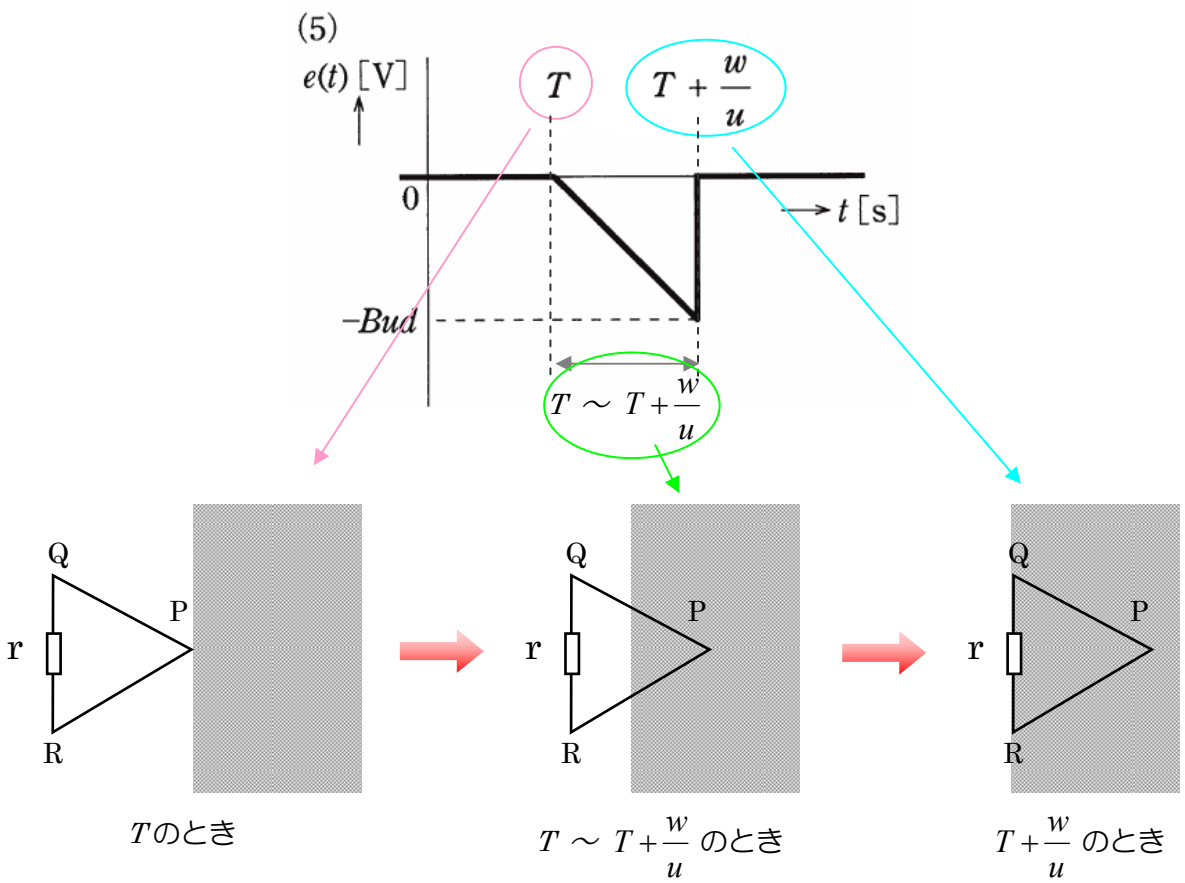
両方に当てはまるグラフは(5)なので、(5)が正解ということがわかります。

答　(5)

さらに、導体(三角形ループ)全てが磁界の中に入った状態について考えてみます。

導体(三角形ループ)全てが磁界の中に入ると、
Q−Rに発生する起電力 と、Q−P と P−R に発生する起電力を合成したものは等しくなる。
そして、Q−Rに発生する起電力 と、Q−P と P−R に発生する起電力 は逆向きなので打ち消しあい、抵抗 r の起電力は 0 になる。
つまり、三角ループ全体がソレノイドの内側(磁束の中)に入った瞬間 ($T+\frac{w}{u}$ のとき)に起電力の総和は 0 になります。

三角形ループの動きは、次のようになります。



ソレノイドとは、巻線の巻かれた鉄心のことで、ここでは「磁界を発生させるもの」として登場しています。
三角ループは、磁界の中を移動する導体になります。

この問題は、三角ループ導体を移動させて磁界に突入させたとき、三角ループ導体に発生する起電力の変化を問うものです。

磁束の中で導体を移動させると、フレミング右手の法則により導体に誘導起電力が発生して電流が流れることがわかる。
ただし、ループ状の導体全体を磁束の中(磁界中)で移動させると、このループに発生する起電力は 0 になります。

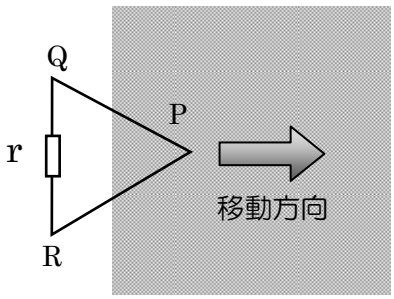
ループ導体全体を磁束の中で移動させたときに発生する起電力が 0 になる理由については、ファラデーの法則からも説明できます。

<u>電磁誘導に関するファラデーの法則</u>

「電磁誘導によってコイルに発生する起電力の大きさは、
そのコイルを貫く磁束の時間的変化の割合に比例する」

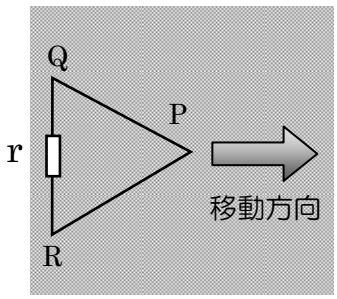
この法則には、「コイルを貫く磁束量が増えると起電力も増える」、「コイルを貫く磁束量が変化しないと起電力は発生しない」という内容も含まれています。
このことを踏まえて、見ていきましょう。

この問題の「三角ループ導体」を「1 巻きのコイル」として考えると、
$T \sim T+\frac{w}{u}$ のときは、コイル内(三角ループ内)の磁束量が増加しているので、三角ループに発生する起電力も増えていく。
しかし、$T+\frac{w}{u}$ 以降(三角ループが磁界の中に全て入った状態)では、磁束密度が一定の磁界内を移動するので、コイル内(三角ループ内)の磁束量は変化しない。
したがって起電力は発生しない。



$T \sim T+\frac{w}{u}$ のとき

三角ループに発生する起電力は増加する



$T+\frac{w}{u}$ 以降

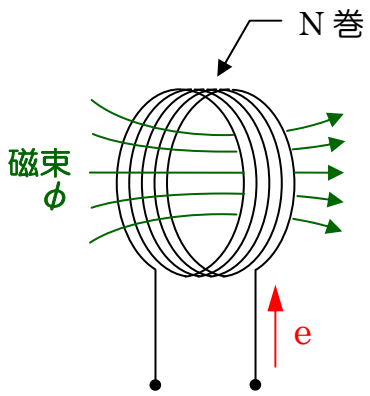
三角ループに起電力は発生しない

要は、コイル内(三角ループ内)に磁束があっても磁束量が一定で変化しなければ起電力は発生しないということです。

ちなみに、ファラデーの法則に関する公式は次のようになります。

公式

コイルを貫く磁束が t 秒間で ϕ [Wb]変化した時の、
コイルに発生する誘導起電力 e を求める公式



$$e = -N\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

e [V] ： コイルに発生する誘導起電力
N ： コイルの巻数
$\Delta\phi$ [Wb] ： 変化した磁束の量
Δt [秒] ： 磁束が変化するのに要した時間（変化した時間の量）

公式からは次のようなことがわかります

- 磁束 ϕ の変化量が多いほど、<u>発生する起電力は大きくなる</u>
- 磁束量が変化するのに要した時間 t が短いほど、<u>発生する起電力は大きくなる</u>

つまり、短時間に磁束量が多く変化する場合、<u>起電力が大きくなる</u>ことを意味します。
また、コイル内に磁束があるとしても、磁束量の変化がゼロ ($\Delta\phi = 0$) ならば<u>起電力は発生しません</u>。

フレミング右手の法則

磁界中において導体を移動させると、導体に誘導起電力が発生します。

このときの
- 導体の移動方向
- 磁界(磁束)の向き B
- 誘導起電力の向き e

を 右手を使ってあらわした法則を
<u>フレミング右手の法則</u> と言います。

法則

<u>図 1</u>

図 1 のように
右手の親指、人差し指、中指を
互いに直角に曲げて

- 親指を 導体の移動方向
- 人差し指を 磁界の向き B としたとき
- 中指が 誘導起電力の向き e になります。

図 2 のような磁界中において、
上方向に導体を移動させると、
e の向きに誘導起電力が発生します。

(フレミング右手の法則が当てはまる)

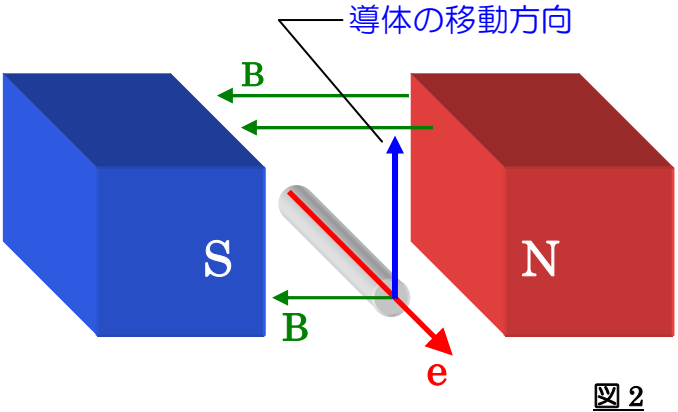


図 2

導体に発生する起電力の公式

磁界中で導体を移動させると、導体に誘導起電力が発生しますが、
その誘導起電力の大きさは、次の公式で求めることができます。

公式

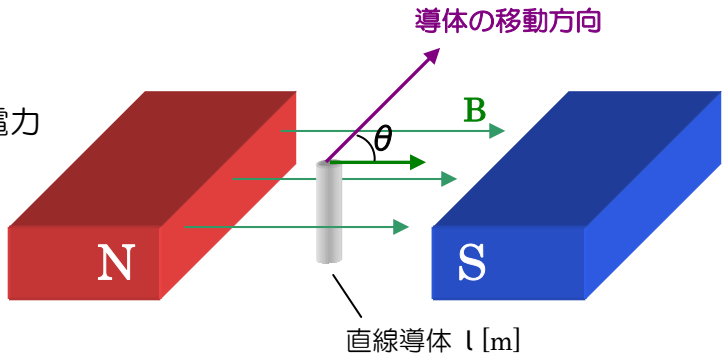
磁束密度 B の磁界の中を長さ l の直線導体が、速度 v、角度 θ で移動するとき
導体に発生する起電力 e の大きさを求める公式

$$e = Blv\sin\theta$$

e [V]：導体に発生する誘導起電力

B [T]：磁束密度

l [m]：導体の長さ

v [m/s]：導体の移動する速度

θ ：磁束密度(磁束) と 導体の移動方向 のなす角度