

物 理

- I 次の文章を読み、 ～ に適切な数値を解答欄に記入せよ。また、 ～ には指定された選択肢からもっとも適切なものを一つ選び解答欄にマークせよ。異なる設問では同じ選択肢をマークしてもよい。選択肢の中の任意の二つのグラフにおいて、軸の尺度（スケール）は互いに無関係である。円周率が必要な場合は 3.14 を用いること。

図のように、起電力 3.0 V の電池、抵抗値が $10\ \Omega$ の抵抗、電気容量がそれぞれ $1.0\ \mu\text{F}$ 、 $2.0\ \mu\text{F}$ のコンデンサー、自己インダクタンスが $5.0\ \text{mH}$ のコイル、スイッチ S を接続した。ただし、電池の内部抵抗は無視できるものとする。最初 S は開いており、二つのコンデンサーに電荷は蓄えられていないものとする。

- 〔1〕 スイッチ S を a 側に入れた直後、抵抗値が $10\ \Omega$ の抵抗を流れる電流の大きさは A である。

- 〔2〕 〔1〕の後、抵抗値が $10\ \Omega$ の抵抗を流れる電流は時間とともに のように変化し、電気容量が $2.0\ \mu\text{F}$ のコンデンサーの電気量は時間とともに のように変化する。

〔1〕の後、十分に時間が経過したとき、抵抗値が $10\ \Omega$ の抵抗を流れる電流の大きさは A であり、電気容量が $2.0\ \mu\text{F}$ のコンデンサーの電気量の大きさは C である。

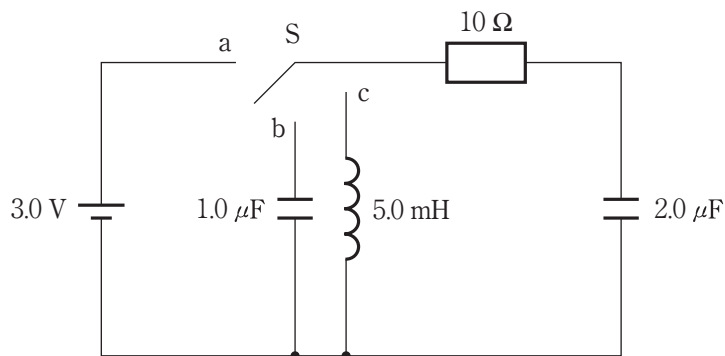
- 〔3〕 〔2〕の後、スイッチ S を b 側に切りかえる。スイッチ S を b 側に入れた直後に、抵抗値が $10\ \Omega$ の抵抗を流れる電流の大きさは A である。

〔4〕 〔3〕の後、電気容量が $2.0\ \mu\text{F}$ のコンデンサーの電気量は、時間とともに のように変化し、電気容量が $1.0\ \mu\text{F}$ のコンデンサーの電気量は、時間とともに のように変化する。

〔3〕の後、十分に時間が経過したとき、電気容量が $1.0\ \mu\text{F}$ のコンデンサーの電気量の大きさは Cであり、電気容量が $2.0\ \mu\text{F}$ のコンデンサーの電気量の大きさは Cである。

〔3〕の後、十分に時間が経過するまでの間に抵抗値が $10\ \Omega$ の抵抗で発生したジュール熱は Jである。

〔5〕 〔4〕の後、スイッチSをc側に入れると、減衰しながら振動する電流が、抵抗値が $10\ \Omega$ の抵抗に流れる。抵抗値が十分小さいので、振動電流の周波数は Hzである。

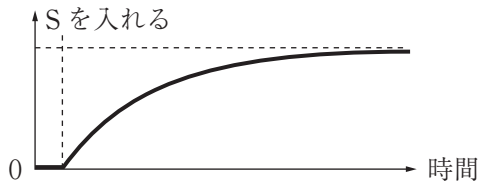


図

ア ～ エ に対する選択肢

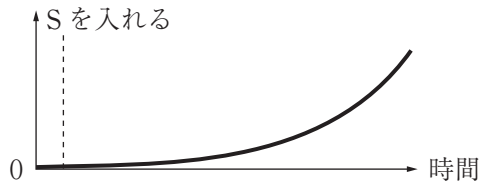
①

電流または電気量



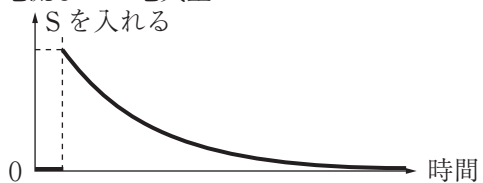
②

電流または電気量



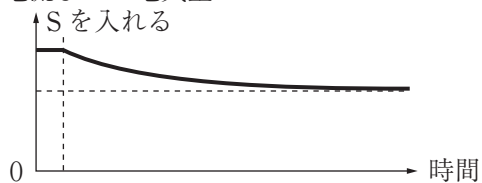
③

電流または電気量



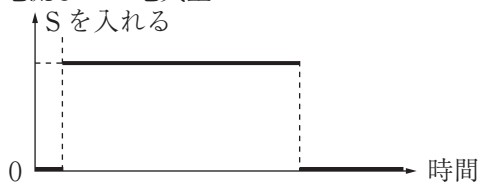
④

電流または電気量



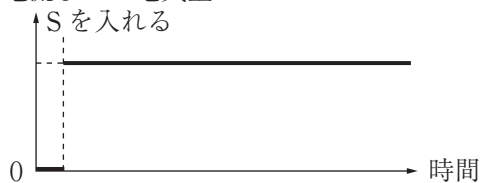
⑤

電流または電気量



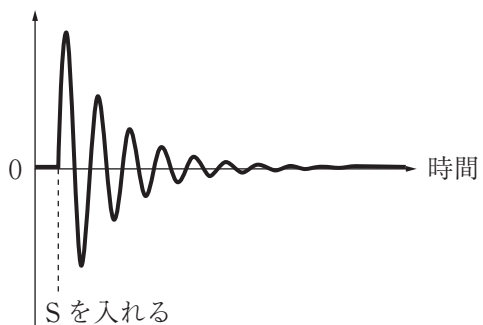
⑥

電流または電気量



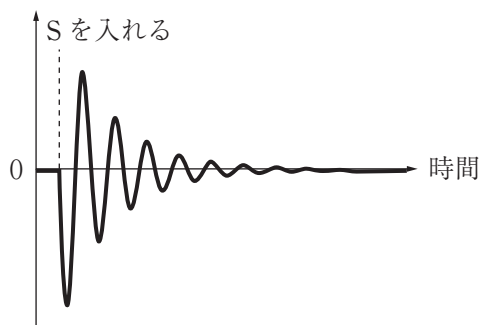
⑦

電流または電気量



⑧

電流または電気量



II 次の文章を読み、 ～ に適切な数式または数値を解答欄に記入せよ。また、 ～ には指定された選択肢からもっとも適切なものをつ選び解答欄にマークせよ。以下では音速を V ，重力加速度の大きさを g とする。また，音源の大きさは無視できるほど小さく，音源は音速よりも十分低速で移動するものとする。なお，位相の単位はラジアンとする。

〔1〕 図1のように，振動数 f の音を出す静止音源 S と可動式の反射板 R を x 軸上に置く。音源 S と反射板 R を結ぶ線分上に静止している観測者 A には，音源 S から直接届く音と反射板 R からの反射音が合わさった音が聞こえる。

反射板 R が音源 S から遠ざかるように x 軸上を速さ v_0 で等速直線運動する場合を考える。反射板 R で受け取る音の振動数は であるため，反射板 R は振動数 の音を出しながら観測者 A から遠ざかるように速さ v_0 で等速直線運動する音源とみなすことができる。したがって，観測者 A が聞く反射音の振動数は となる。音源 S から直接届く音と反射板 R から届く反射音が合わさることにより，観測者 A に聞こえる音の大きさは周期的に変動した。このときの変動の周期は であり，この現象をうなりと呼ぶ。

〔2〕 図2のように， $x = L$ （ただし， $L > 0$ ）の位置に振動数 f の音を出す音源 S_1 を配置する。また， $0 < x < L$ を満たす位置に音源 S_1 と異なる振動数の音を出す音源 S_2 を配置する。音源 S_1 を静止させ，音源 S_1 にぶつからないように音源 S_2 を速さ v_0 で x 軸正の向きに等速直線運動させる。このとき原点（ $x = 0$ ）に静止している観測者 A が音を聞く。音源 S_1 から出る波の波長は である。

次に，等速直線運動している音源 S_2 だけから音を出すようにしたところ，観測者 A には振動数 f の音が聞こえた。このことから，音源 S_2 の振動数は ，周期は $\frac{1}{\text{え}}$ であることがわかる。

次に図3のような配置を考える。音源 S1 を静止させ、音源 S2 を速さ v_0 で x 軸正の向きに等速直線運動させる。音源 S2 が位置 $x = L$ にあった時刻を $t = 0$ とする。時刻 $t = 0$ に音源 S1 と音源 S2 から互いに逆位相の音を出すようにしたところ、時刻 $t = 0$ に音源 S1, S2 から出た音は観測者 A に時刻 $t = \boxed{\text{イ}}$ に届き、その音は $\boxed{\text{ウ}}$ 。また、時刻 $t = 0$ から音源 S2 の周期の a 倍（ただし、 $0 < a < 1$ ）だけ経過した時刻 $t = \frac{a}{\boxed{\text{え}}}$ に音源 S2 から出た音は、時刻 $t = \boxed{\text{お}} + \boxed{\text{イ}}$ に観測者 A に届き、この音と時刻 $t = 0$ に音源 S2 から出た音との位相の差は $2\pi a$ である。時刻 $t = \boxed{\text{お}} + \boxed{\text{イ}}$ に音源 S1 から観測者 A に届く音は、音源 S1 を時刻 $t = \boxed{\text{お}}$ に出たものである。このことから、音源 S1 から時刻 $t = \boxed{\text{お}}$ に出た音と音源 S1 から時刻 $t = 0$ に出た音との位相の差は $\boxed{\text{か}}$ であることがわかる。

- 〔3〕 図4のように、振動数 f の音を出す静止音源 S1 を置き、振動数 f_0 （ただし、 $f_0 < f$ ）の音を出す音源 S2 を投げ上げる。

時刻 $t = 0$ において、静止している観測者 A の位置から音源 S2 を速さ v_0 で鉛直上向きに投げ上げた。音源 S1 から届く音と音源 S2 から届く音が同じ振動数の音として聞こえたのは、音源 S2 から時刻 $t = \boxed{\text{エ}}$ に出た音が観測者 A に届く時刻 $t = \frac{\boxed{\text{オ}}}{2gf^2V}$ のときであった。

ア に対する選択肢

- | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| ① $\frac{(V + v_0)^2}{fv_0(V - v_0)}$ | ② $\frac{V(V + v_0)}{fv_0(V - v_0)}$ | ③ $\frac{V(V + v_0)}{f(V - v_0)^2}$ |
| ④ $\frac{V + v_0}{f(V - v_0)}$ | ⑤ $\frac{V + v_0}{fV}$ | ⑥ $\frac{V + v_0}{2fV}$ |
| ⑦ $\frac{V + v_0}{fv_0}$ | ⑧ $\frac{V + v_0}{2fv_0}$ | ⑨ $\frac{1}{f}$ |

イ に対する選択肢

- | | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------|
| ① $\frac{L}{V + v_0}$ | ② $\frac{L}{V - v_0}$ | ③ $\frac{L}{V}$ |
| ④ $\frac{V + v_0}{L}$ | ⑤ $\frac{V - v_0}{L}$ | ⑥ $\frac{V}{L}$ |

ウ に対する選択肢

- ① 強め合う ② 弱め合う

エ に対する選択肢

- | | |
|---|---|
| ① $\frac{1}{gf} \{ f(V + v_0) - f_0 V \}$ | ② $\frac{1}{gf} \{ f(V + v_0) + f_0 V \}$ |
| ③ $\frac{1}{g} (V + v_0)$ | ④ $\frac{1}{g} (V - v_0)$ |
| ⑤ $\frac{1}{gf} (f_0 V + f v_0)$ | ⑥ $\frac{1}{gf} (f_0 V - f v_0)$ |
| ⑦ $\frac{f_0}{gf} (V + v_0)$ | ⑧ $\frac{f_0}{gf} (V - v_0)$ |

オ に対する選択肢

① $f_0^2 (V + v_0)^2$

③ $f^2 V^2 - f_0^2 v_0^2$

⑤ $2f^2 V^2 - f_0^2 v_0^2$

⑦ $f^2 V^2 - f_0^2 (V + v_0)^2$

⑨ $f^2 (V + v_0)^2 - f_0^2 V^2$

② $(f - f_0)^2 (V + v_0)^2$

④ $f^2 V^2 + f_0^2 v_0^2$

⑥ $2f^2 V^2 + f_0^2 v_0^2$

⑧ $f^2 V^2 + f_0^2 (V + v_0)^2$

⑩ $f^2 (V + v_0)^2 + f_0^2 V^2$



図 1

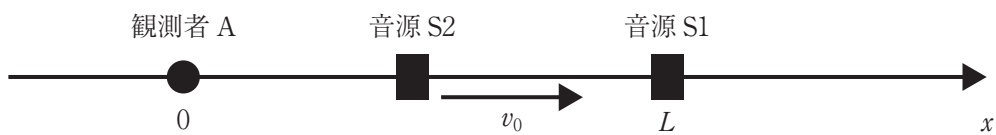


図 2



図 3



図 4

Ⅲ 次の文章を読み、あ ～ く に適切な数式を解答欄に記入せよ。また、ア ～ オ には指定された選択肢からもっとも適切なものを一つ選び、解答欄にマークせよ。あ ～ え の解答欄に記入する数式は、文字定数として $m, r, \omega, \Delta r, \Delta \omega$ 以外を用いてはならない。また、か ～ く の解答欄に記入する数式は、文字定数として M, m, ω, d 以外を用いてはならない。円周率が必要な場合は π を用いること。絶対値が1よりも十分に小さい実数 z に対して、 $(1+z)^a \doteq 1+az$ という近似式を用いてもよい。

図に示すように、質量 m の小球が十分に長い糸につながれた状態で、なめらかな水平板上の半径 r の円軌道上を角速度 ω で等速円運動している。糸は円の中心のなめらかな小さい穴を通して、水平板の下方へ降りており、円の中心から L だけ降りた末端に質量 M のおもりが静止した状態でぶら下がっている。この状態を状態 A とする。糸の質量および伸縮は無視できる。また、おもりの大きさは無視でき、重力加速度の大きさは g である。

〔1〕 状態 A では、小球の速さは あ であり、運動エネルギーは い である。また、小球とともに回転する観測者から見たときに、小球にはたらく遠心力の大きさは う であり、この遠心力と糸の張力はつりあっている。次に、おもりに手を添えて、鉛直下向きにおもりを微小な変化量 Δr だけゆっくりと移動させたところ、小球の円軌道の半径は $r - \Delta r$ となり、円運動の角速度は $\omega + \Delta \omega$ となった。この過程での小球の運動エネルギーの変化 ΔE は

$$\Delta E = \text{ え } - \text{ い }$$

である。ここで、 r の変化量 Δr は r と比べて十分に小さい量であり、その結果生じる ω の変化量 $\Delta \omega$ も ω と比べて十分に小さい量であるとして近似を行う。また、 $\frac{\Delta r}{r}$ と $\frac{\Delta \omega}{\omega}$ の積は十分に小さいとして無視すると、 ΔE は

$$\Delta E \doteq \text{ い } \times \left(\text{ ア } \right)$$

と近似される。また、おもりが鉛直下向きに Δr だけ移動する間の糸の張力の変化を無視すると、この過程において糸の張力が小球にする仕事は、

$\boxed{\text{う}}$ $\times \Delta r$ となる。この仕事は小球の運動エネルギーの変化 ΔE に等しいとみなせる。以上より、 r , ω , Δr , $\Delta \omega$ は、

$$\boxed{\text{イ}} = 0$$

の関係式を満たす。これより、おもりが鉛直方向に移動し、小球が運動している間、円の中心から小球までの距離の 2 乗と角速度の積は一定値を保つことがわかる。

〔2〕 図のように、小球の円軌道の中心を原点 O とし、鉛直方向に x 軸をとり、下向きを正とする。状態 A でのおもりの位置は $x = L$ であり、おもりにとはたらく力はつりあい、この位置でおもりは静止していた。このとき、円軌道の半径 r は、文字定数として M, m, ω, g のみ を用いて、 $\boxed{\text{お}}$ と表される。このつりあいの位置から、おもりをゆっくりと x 軸正の向きに d だけ移動させた後、静かに手をはなした。 d は円軌道の半径 r と比べて十分に小さい正の量である。この後の運動を以下で議論したい。

ある時刻でのおもりの位置座標を x , x 軸方向の加速度を a とする。ここで、小球の円軌道の半径と角速度として、それぞれ、状態 A と同じ文字 r と ω を用いることにする。おもりにとはたらく力は重力と糸の張力 T であるから、おもりの運動方程式は

$$Ma = -T + Mg$$

である。次に、小球とともに回転する観測者から見れば、小球は円の中心方向に運動する。外向きを正として、この方向の小球の加速度を a_r とすると、小球にはたらく力は糸の張力と外向きの遠心力 $\boxed{\text{う}}$ であるから、小球の運動方程式は

$$ma_r = -T + \boxed{\text{う}}$$

となる。また、小球とおもりは長さが一定の糸でつながれているので、 $x + r$ は一定であり、 $a_r = -a$ が成り立つ。したがって、張力 T を消去すると、

$$(M + m)a = Mg - \boxed{\text{う}}$$

という関係式が得られる。これより、おもりの運動は、 $M + m$ の質量をもつ質点が力 $Mg - \boxed{\text{う}}$ を受けて行う運動と同じであることがわかる。ここで、おもりを d だけ移動させ、静かに手をはなした後のおもりの運動に話をもどそう。

おもりが位置 $x = L + \Delta r$ にあるとき、小球の円軌道の半径は $r - \Delta r$ 、円運動の角速度は $\omega + \Delta\omega$ であるので、おもりにはたらく力 F は鉛直下向きを正として、

$$F = \boxed{\text{う}}$$

である。 Δr は r と比べて十分に小さい量であり、 $\Delta\omega$ は ω と比べて十分に小さい量であるとして、〔1〕と同様の近似を行うと、 F は

$$F \doteq -Mg \times \left(\boxed{\text{エ}} \right)$$

となる。ここで、 $(M + m)a$ と F が一致する。また、 r 、 ω 、 Δr 、 $\Delta\omega$ が満たす式 $\boxed{\text{イ}} = 0$ を用いると、

$$a = - \boxed{\text{か}} \times \Delta r$$

が得られる。この関係式は単振動で観測される加速度と変位の関係式と同じ形をもっている。したがって、 d が L よりも十分に小さい場合にはおもりは小球とともに単振動を行っており、その周期は $\boxed{\text{き}}$ であることがわかる。この場合、おもりは、位置 $x = \boxed{\text{オ}}$ を通過するとき、最大値 $\boxed{\text{く}}$ の速さをとる。

ア , イ , エ に対する選択肢

- | | | | |
|---|--|--|--|
| ① $\frac{\Delta r}{r} + \frac{\Delta \omega}{\omega}$ | ② $\frac{\Delta r}{r} + \frac{2\Delta \omega}{\omega}$ | ③ $\frac{\Delta r}{r} + \frac{3\Delta \omega}{\omega}$ | ④ $\frac{\Delta r}{r} + \frac{5\Delta \omega}{\omega}$ |
| ⑤ $-\frac{\Delta r}{r} + \frac{\Delta \omega}{\omega}$ | ⑥ $-\frac{\Delta r}{r} + \frac{2\Delta \omega}{\omega}$ | ⑦ $-\frac{\Delta r}{r} + \frac{3\Delta \omega}{\omega}$ | ⑧ $-\frac{\Delta r}{r} + \frac{5\Delta \omega}{\omega}$ |
| ⑨ $\frac{2\Delta r}{r} + \frac{\Delta \omega}{\omega}$ | ⑩ $\frac{2\Delta r}{r} + \frac{2\Delta \omega}{\omega}$ | ⑪ $\frac{2\Delta r}{r} + \frac{3\Delta \omega}{\omega}$ | ⑫ $\frac{2\Delta r}{r} + \frac{5\Delta \omega}{\omega}$ |
| ⑬ $-\frac{2\Delta r}{r} + \frac{\Delta \omega}{\omega}$ | ⑭ $-\frac{2\Delta r}{r} + \frac{2\Delta \omega}{\omega}$ | ⑮ $-\frac{2\Delta r}{r} + \frac{3\Delta \omega}{\omega}$ | ⑯ $-\frac{2\Delta r}{r} + \frac{5\Delta \omega}{\omega}$ |
| ⑰ $\frac{3\Delta r}{r} + \frac{\Delta \omega}{\omega}$ | ⑱ $\frac{3\Delta r}{r} + \frac{2\Delta \omega}{\omega}$ | ⑲ $\frac{3\Delta r}{r} + \frac{3\Delta \omega}{\omega}$ | ⑳ $\frac{3\Delta r}{r} + \frac{5\Delta \omega}{\omega}$ |
| ㉑ $-\frac{3\Delta r}{r} + \frac{\Delta \omega}{\omega}$ | ㉒ $-\frac{3\Delta r}{r} + \frac{2\Delta \omega}{\omega}$ | ㉓ $-\frac{3\Delta r}{r} + \frac{3\Delta \omega}{\omega}$ | ㉔ $-\frac{3\Delta r}{r} + \frac{5\Delta \omega}{\omega}$ |
| ㉕ $\frac{5\Delta r}{r} + \frac{\Delta \omega}{\omega}$ | ㉖ $\frac{5\Delta r}{r} + \frac{2\Delta \omega}{\omega}$ | ㉗ $\frac{5\Delta r}{r} + \frac{3\Delta \omega}{\omega}$ | ㉘ $\frac{5\Delta r}{r} + \frac{5\Delta \omega}{\omega}$ |
| ㉙ $-\frac{5\Delta r}{r} + \frac{\Delta \omega}{\omega}$ | ㉚ $-\frac{5\Delta r}{r} + \frac{2\Delta \omega}{\omega}$ | ㉛ $-\frac{5\Delta r}{r} + \frac{3\Delta \omega}{\omega}$ | ㉜ $-\frac{5\Delta r}{r} + \frac{5\Delta \omega}{\omega}$ |

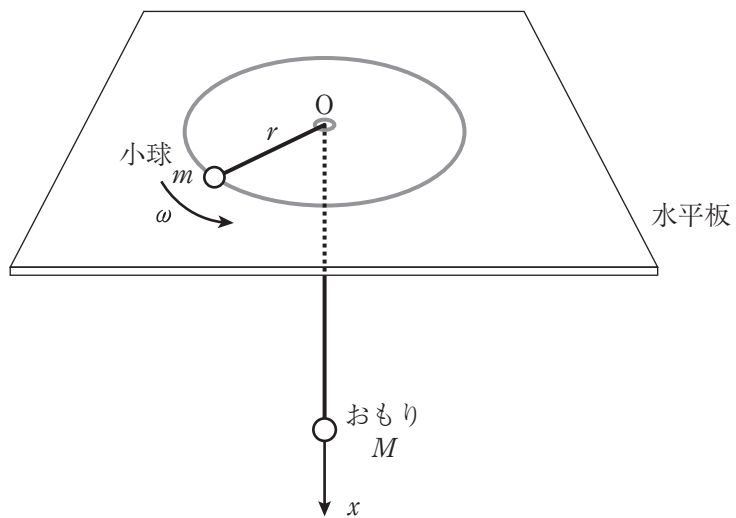
ウ に対する選択肢

- | | |
|---|---|
| ① $m(r - \Delta r)(\omega + \Delta \omega) + Mg$ | ② $m(r - \Delta r)(\omega + \Delta \omega)^2 + Mg$ |
| ③ $m(r - \Delta r)^2(\omega + \Delta \omega) + Mg$ | ④ $m(r - \Delta r)^2(\omega + \Delta \omega)^2 + Mg$ |
| ⑤ $-m(r - \Delta r)(\omega + \Delta \omega) + Mg$ | ⑥ $-m(r - \Delta r)(\omega + \Delta \omega)^2 + Mg$ |
| ⑦ $-m(r - \Delta r)^2(\omega + \Delta \omega) + Mg$ | ⑧ $-m(r - \Delta r)^2(\omega + \Delta \omega)^2 + Mg$ |
| ⑨ $m(r - \Delta r)(\omega + \Delta \omega) - Mg$ | ⑩ $m(r - \Delta r)(\omega + \Delta \omega)^2 - Mg$ |
| ⑪ $m(r - \Delta r)^2(\omega + \Delta \omega) - Mg$ | ⑫ $m(r - \Delta r)^2(\omega + \Delta \omega)^2 - Mg$ |
| ⑬ $-m(r - \Delta r)(\omega + \Delta \omega) - Mg$ | ⑭ $-m(r - \Delta r)(\omega + \Delta \omega)^2 - Mg$ |
| ⑮ $-m(r - \Delta r)^2(\omega + \Delta \omega) - Mg$ | ⑯ $-m(r - \Delta r)^2(\omega + \Delta \omega)^2 - Mg$ |

オ

 に対する選択肢

- | | | | |
|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------|
| ① $L - d$ | ② $L - \frac{\sqrt{3}}{2}d$ | ③ $L - \frac{d}{\sqrt{2}}d$ | ④ $L - \frac{d}{2}d$ |
| ⑤ $L - \frac{d}{4}d$ | ⑥ $L + \frac{\sqrt{3}}{2}d$ | ⑦ $L + \frac{d}{\sqrt{2}}d$ | ⑧ $L + \frac{d}{2}d$ |
| ⑨ $L + \frac{d}{4}d$ | ⑩ L | ⑪ $L + d$ | |



図