

問題 24 超電導リニアの加速と浮上および案内

超電導リニアモーターカーの簡略化されたモデルを用いて、その加速と浮上・案内の原理を考察する。なお、解答に当たっては次の実験事実を用いてよい。

「平行導線に電流が流れるとき、二つの電流の積が大きいほど、また、導線間隔が狭いほど、導線間にはたらく電磁力は大きい。二つの電流の向きが同じときには引力がはたらき、逆のときには斥力がはたらく。」

I まず、加速について考える。

図 1 は、浮上したまま直線軌道に沿って速度 v で走行する超電導リニアモーターカーの側面図である。

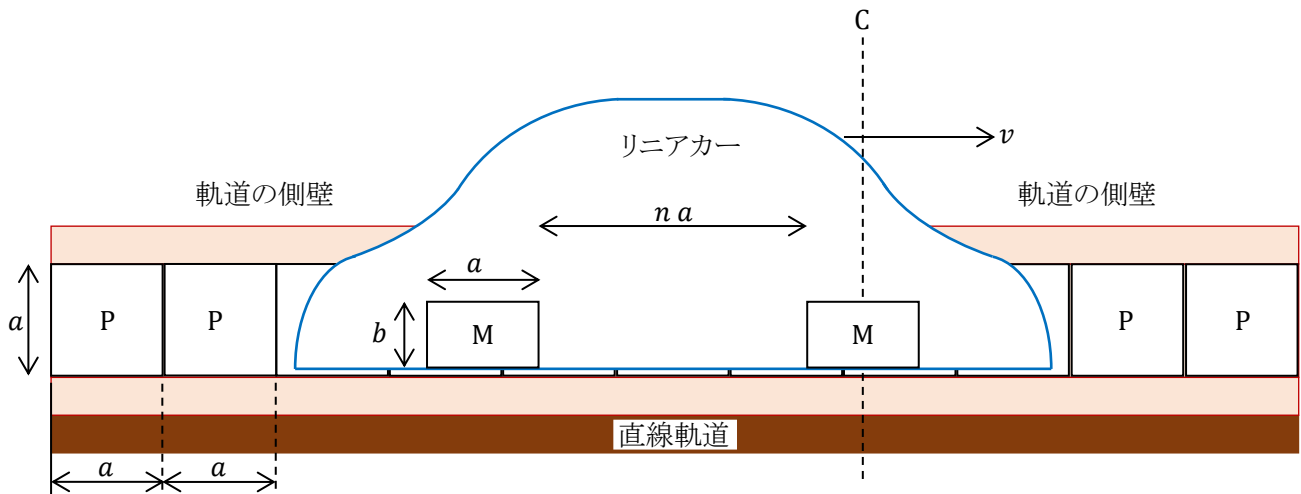


図 1

図の M は、長さ a 、幅 b ($b < a$) の超電導コイル (Superconducting Magnets) で、車体の両側面に取り付けられている。2 つの超電導コイルの間隔は a の整数倍である。これらは極低温に冷却されており、どのコイルも最初に注入した同じ大きさ I の電流が、いつまでも変化することなく流れ続ける。その電流が作り出す磁場は、コイル面の近傍では、面に垂直かつ一様であるとし、その磁束密度の大きさを B とする。

図の P は推進コイル (Propulsion Coils) で、リニアカーが走行する U 字形の軌道 (guideway) の両側壁に、全行路に亘って隙間なく設置されている。簡単のために、推進コイルは一辺の長さが a の正方形とする。個々の推進コイルには、その前をリニアカーが通過する時間帯だけ、遠隔操作によって電流を流す。その向きは、常にリニアカーに推進力がはたらくように変化させる。そのときの電流の周期を求める。

図 2 は、図 1 の鉛直断面 C をリニアカーの進行方向に向かって見たものである。車体の両側面の同じ位置に取り付けられた超電導コイル M には、図に示された向きに電流 I が流れている。 $\otimes$ は紙面に垂直で表から裏の向きで、 $\odot$ はその逆である。

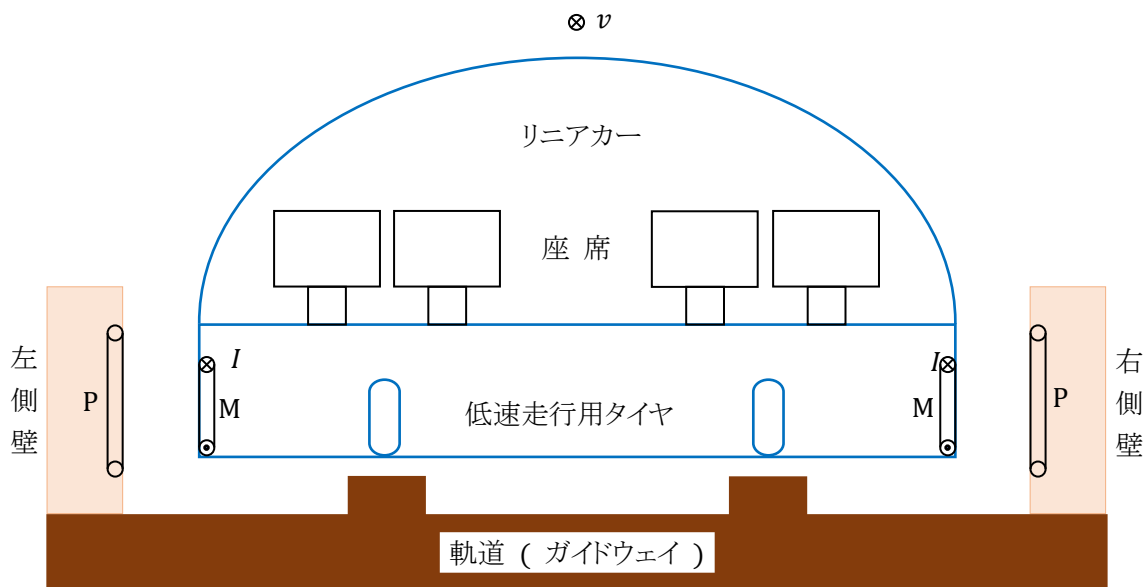


図 2

図 3 は、リニアカーを上空から見下ろしたときに、超電導コイル M の近くにある 3 つの推進コイル P_1 、 P_2 、 P_3 の位置を示している。

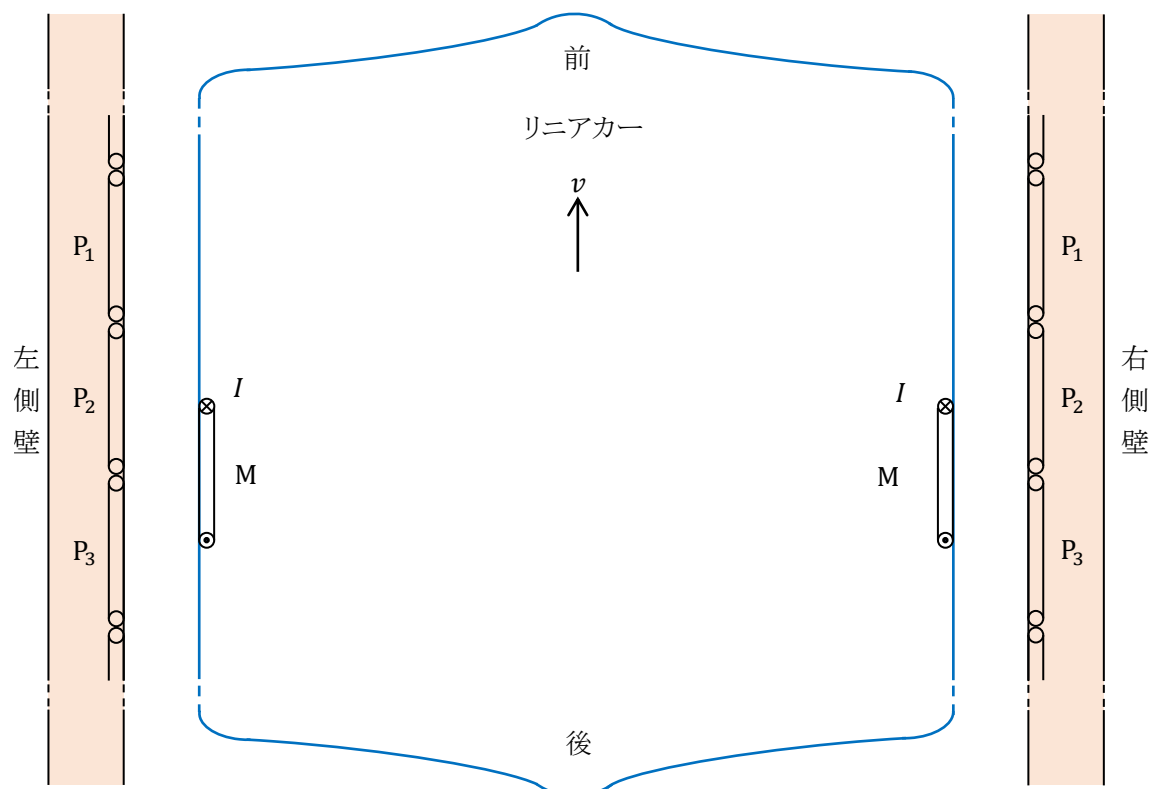


図 3

問 1 図 3 の瞬間において、超電導コイルと推進コイルの間にはたらく電磁力によって、リニアカーに推進力（速度 v を増加させようとする力）を生じさせるためには、推進コイル P_1, P_2, P_3 の鉛直辺を流れる電流の向きをどちら向きにすればよいか。図 3 の $\bigcirc$ に $\otimes$ と $\odot$ で示せ。また、その理由を述べよ。図を用いて説明してもよい。

図 3 の瞬間から微小時間が経つと、 M と P_2 が真正面に向き合うようになる。この瞬間、リニアカーにはたらく推進力は 0 となるが、慣性によってリニアカーはそのまま進行し、超電導コイル M は推進コイル P_1 と P_2 に向き合うようになる。このときにも、図 3 と同様に、リニアカーに推進力がはたらくようにすれば、リニアカーを加速することができる。

問 2 そのためには、推進コイルを流れる電流を周期的に変化させなければならない。その周期はいくらか。

このようにしてリニアカーを加速することは、原理的には可能だが、推進力が周期的に時々刻々変化するので、リニアカーは振動を起こしてしまう。実際のリニアカーでは、推進コイルに三相交流を流して、推進力が一定に近くなるようにしている。

II 次に、浮上原理を考える。

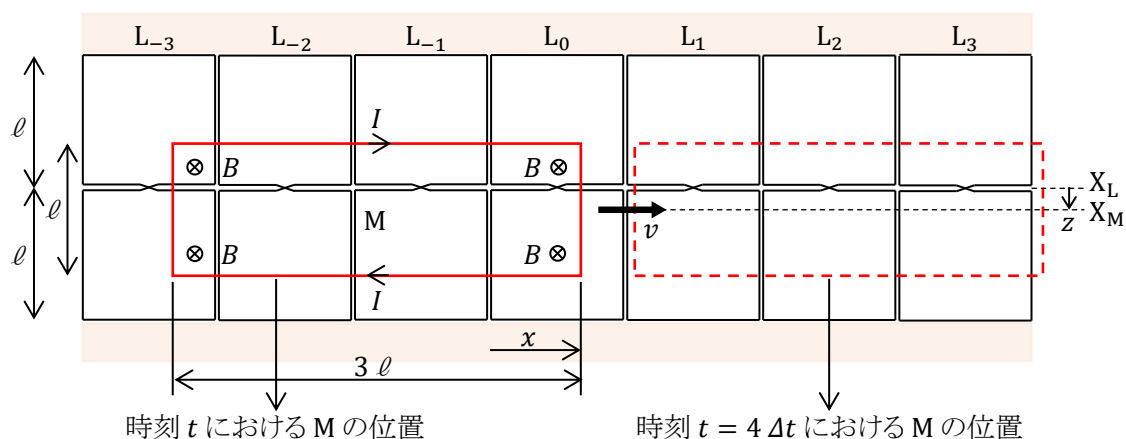


図 4

図 4 の L_k は 8 の字形の閉じた浮上コイル (Levitation Coils) で、軌道の両側壁に、全行路に亘って隙間なく設置されている。簡単のために、浮上コイルの上半分と下半分は一边の長さが ℓ の正方形とする。上半分の下辺と下半分の上辺の間隔は無視できるほど小さく、8 の字の交差するところでは二つの導線は絶縁されている。浮上コイルの前をリニアカーの超電導コイル M が通り過ぎると、電磁誘導によって浮上コイル L_k に誘導電流が流れる。これらの電流 $i_k(t)$ が超電導コイルを流れる一定電流 I に電磁力をおよぼすことによって、リニアカーが浮上する。

ここでは超電導コイルの形を, $a = 3\ell$, $b = \ell$ の長方形とし, その水平対称軸 X_M は浮上コイルの水平対称軸 X_L から下向きに z ($0 < z < \frac{\ell}{2}$) だけずれているとする。

図 4 は, 軌道の左側壁に設置された浮上コイル L_0 の前を, リニアカーの左側面に取り付けられた超電導コイル M の先端が, 等速度 v で通過し始めてから, 時間 t だけ経ったときの様子を表している。

問 3 図 4 のように, M の先端が L_0 の前を距離 x (ただし, $x = vt < \ell$) だけ通過したとき, 浮上コイル L_0 の上半分と下半分を, 紙面の表から裏へ貫く磁束 Φ_u と Φ_d を, B , ℓ , z , x を用いて表せ。

問 4 このとき, 8 の字形の浮上コイルに生じている誘導起電力 V_{emf} を B , z , v を用いて表せ。ただし, 下半分の下辺を右向きに電流を流そうとする (したがって, 上半分の上辺を右向きに電流を流そうとする) 誘導起電力を正とする。

問 5 浮上コイル L_k の電気抵抗を R , 自己インダクタンスを L とし, L_0 を流れる誘導電流 $i_0(t)$ の時間変化率を $\frac{di_0}{dt}$ とすれば, V_{emf} , R , L , i_0 , $\frac{di_0}{dt}$ の間にどのような関係式が成り立つか。ただし, L_0 と他の浮上コイルの間の相互インダクタンスは無視できるものとする。

初期条件 $i_0(0) = 0$ のもとに, この関係式から $i_0(t)$ を求めれば,

$$i_0(t) = \frac{2Bzv}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \quad (1)$$

となる。その一例をグラフで表せば, 図 5 の時間帯 $0 \leq t \leq \Delta t \equiv \frac{\ell}{v}$ の部分になる。 $t = \Delta t$ 以後の $i_0(t)$ も, 同様の式を立てて解けば, 図 5 の時間帯 $t \geq \Delta t$ の部分になる。

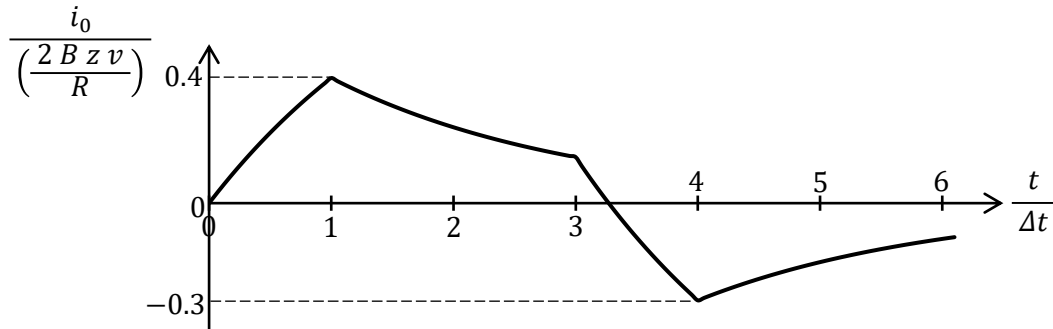


図 5

図 4 に描かれた時刻 t ($0 \leq t \leq \Delta t$) において, 浮上コイル L_{-1} , L_{-2} , L_{-3} を流れる誘導電流 $i_{-1}(t)$, $i_{-2}(t)$, $i_{-3}(t)$ は, $i_0(t)$ を用いて次のように表される。

$$i_{-1}(t) = i_0(t + \Delta t) \quad , \quad i_{-2}(t) = i_0(t + 2\Delta t) \quad , \quad i_{-3}(t) = i_0(t + 3\Delta t)$$

図 5 のグラフが示すように、 $i_{-3}(t)$ が負となる時間帯があるが、それを除けば、浮上コイル L_k ($k = 0, -1, -2, -3$) には正の向きに電流が流れる。

問 6 正の誘導電流 $i_k(t)$ ($k = 0, -1, -2, -3$) が超電導コイル M を流れる一定電流 I におよぼす電磁力の鉛直成分は上向きになる。その理由を述べよ。図を用いて説明してもよい。

浮上コイル L_{-3} を流れる電流 $i_{-3}(t)$ が負となって、超電導コイル M に鉛直下向きの電磁力をおよぼすことがあるが、そのとき他の 3 つの浮上コイルを流れる電流がおよぼす鉛直上向きの電磁力の和がそれを上まわるので、超電導コイルには常に鉛直上向きの浮上力がはたらく。その大きさは式 (1) からわかるように、 $z v$ に比例する。

リニアカーが静止しているとき、超電導コイル M の位置が $z = 0$ となるように、タイヤが車体を支える。推進力によってリニアカーが動き出し、速度 v が大きくなっても、 $z = 0$ である限り、浮上力のはたらかない。 v が予め設定された値 v_0 になったときに、タイヤを引き込むと、車体は少し沈むが、 $z > 0$ となるので浮上力がはたらき始める。やがて、リニアカーに搭載されているすべての超電導コイルにはたらく浮上力の和がリニアカーの全重量に等しくなる位置 $z = z_0$ に落ち着き、速度 v_0 で等速走行するようになる。ここで、推進力を大きくして加速すると、浮上力が大きくなり、リニアカーは新たなつりあいの位置まで浮上して、等速走行するようになる。

問 7 このとき、一定の推進力をはたらかせているのに、リニアカーは等速走行する。その理由を述べよ。

問 8 なんらかの原因で、速度を変えることなくリニアカーが少し浮き上がれば、そのあとリニアカーは下向きに動く。その理由を述べよ。

III 最後に、案内原理を考える。

高速走行中のリニアカーが横ずれを起こして軌道の側壁に接触すれば、大事故につながる。それを防ぐため、横ずれを起こしたときに、もとの走行路に戻るよう力をはたらかせることを案内という。

図 6 の G_0 と G_r は一辺の長さが ℓ の正方形の案内コイル (Guidance Coils) で、軌道の両側壁に、全行路に亘って隙間なく設置されている。その水平対称軸は浮上コイルの水平対称軸 X_L と同じにしてある。真正面に向き合っている G_0 と G_r は、図のように 2 本の導線でつながれており、一つの閉じた回路 G を成す。

浮上原理を考えると、誘導起電力 V_{emf} の計算を簡単にするために、超電導コイルが作る磁場はコイル面に垂直で一様としたが、実際は、図 7 が示すように、そうではない。軌道の側壁上で超電導コイル M に向き合う面積 $3\ell \times \ell$ の面上での平均磁束密度を B としたのである。図 7 から推測できるように、この平均磁束密度 B は、超電導コイルが軌道の側壁に近づく増加する。以下では、このことに留意して解答せよ。

問 9 リニアカーが軌道の中心線上を走行しているとき、すなわち、軌道の側壁とリニアカーの側面の間隔が両側で同じであるとき、閉回路 G に誘導電流は流れない。その理由を述べよ。図を用いて説明してもよい。

問 10 走行中のリニアカーが横ずれを起こすと、閉回路 G に誘導電流が流れ、リニアカーはもとの走行路に戻る向きの力を受ける。その理由を述べよ。図を用いて説明してもよい。

このように、リニアカーが横ずれを起こしても、自動的にもとの走行路に戻そうとする力がはたらくので、リニアカーの走行は安定している。

実際の超電導リニアでは、浮上コイル L_k が案内コイル G_0 と G_r の役割を兼ねている。

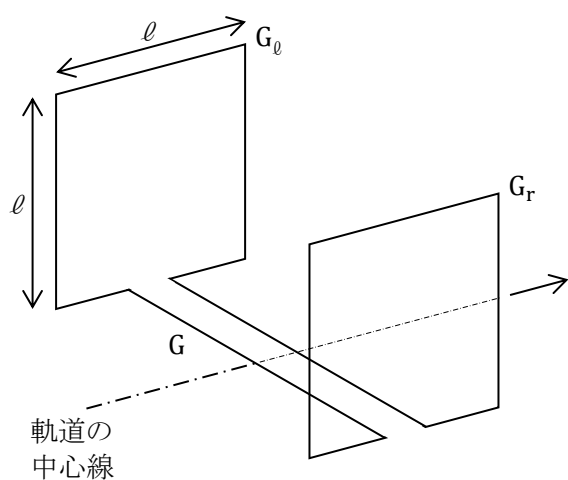


図 6

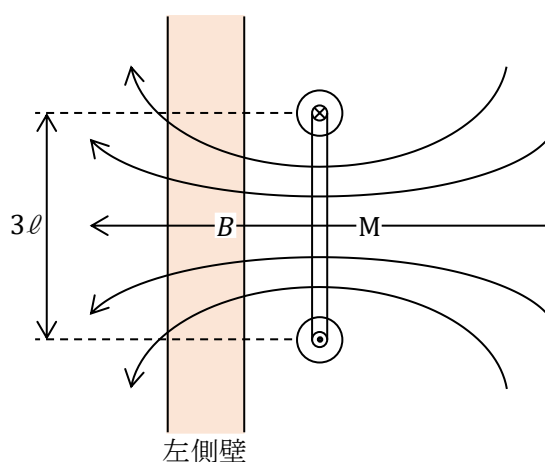


図 7

問題 24 の解答と解説

超電導リニアモーターカーは現実に高速浮上走行しており、リニア新幹線の建設も間近に迫っている。そのような中で、高速浮上走行についての一般向け解説文が数多く出回っているが、その原理（特に浮上原理）を磁石の磁気力で定性的に説明されても、深く考え込む人には何か腑に落ちない。少しは定量的な考察をしないと納得できないのである。この問題はそのような人たちの念頭に置いて作成された。

I

問 1 推進コイルに、図 8 に示す向きの電流を流せば、超電導コイル M の鉛直辺を流れる電流に、矢印で示された向きの電磁力がはたらく。それぞれの辺に 4 つの矢印しか描かれていないが、これら以外の平行電流間の電磁力は、距離が大きいために、合力への寄与が小さいからである。両側面にあるすべての超電導コイルにはたらくこれらの電磁力をベクトルの的に足し合わせれば、合力の向きは速度 v の向きとなり、推進力が生じる。

あるいは、次のように説明してもよい。

図 8 に示すような向きの電流が流れると、各コイルは図に示すような極性をもつ板状の磁石と等価になる。よって、左側（右側）の P_2 と M の向かい合った面の S 極と N 極（N 極と S 極）は引力をおよぼし合い、 P_3 と M の向かい合った面の N 極と N 極（S 極と S 極）は斥力をおよぼし合う。よって、リニアカーにはたらく磁気力の合力の向きは速度 v の向きになる。

問 2 超電導コイル M の先端が一つの推進コイルの前に進入する時刻を $t = 0$ とすると、その推進コイルを通過し終える時刻は $t = a / v \equiv \Delta t$ である。通過直後に各推進コイルを流れる電流の向きを逆向きにすれば、超電導コイル M は通過前と同じ向きの電磁力を受ける。さらに時間 Δt が経って、また電流の向きを逆向きにすれば、各推進コイルを流れるは $t = 0$ のときの状態に戻り、同じ向きの電磁力を受け続ける。よって、推進コイルを流れる電流の周期 T は、 $\boxed{2 a / v}$ である。

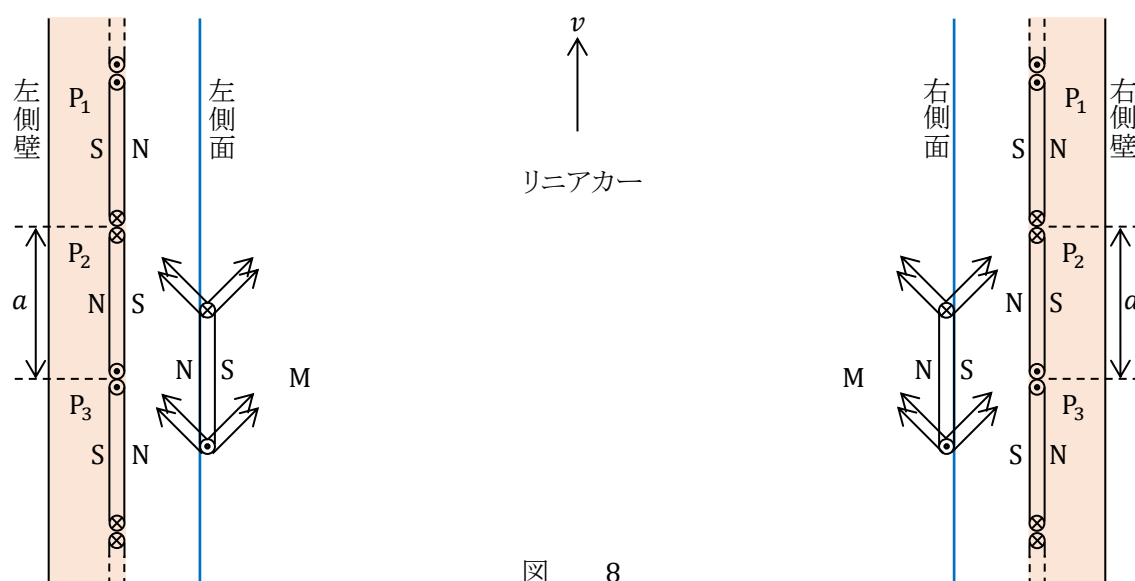


図 8

交流電源の周波数 $f = \frac{1}{T} = \frac{v}{2a}$ は、リニアカーの速度に比例する。よって、リニアカーを加速あるいは減速するためには、電源周波数を変化させなければならない。直流電源を用いて、任意の周波数の交流を発生させる装置をインバーターという。インバーターは昔からあり、現在ではさまざまな家電製品に使われている。家庭に配電された交流電流を平滑回路によって直流に変換し、それをインバーターによって、目的とする周波数の交流に変換している。超電導リニアでもこの技術が用いられている。

三相交流の場合の解説は（補足説明 1）にある。

II

問 3 この問題では、超電導コイル M が作る磁場は紙面に垂直で、表から裏の向きとし、その磁束密度 B が一様であるのだから、

$$\Phi_u = B x \left(\frac{\ell}{2} - z \right), \quad \Phi_d = B x \left(\frac{\ell}{2} + z \right)$$

となる。

問 4 図 4 において、浮上コイル L_0 の上半分と下半分に生じる反時計まわりの誘導起電力 V_u と V_d は、ファラデーの法則より、

$$V_u = \frac{d\Phi_u}{dt} = B \left(\frac{\ell}{2} - z \right) \frac{dx}{dt} = B \left(\frac{\ell}{2} - z \right) v$$

$$V_d = \frac{d\Phi_d}{dt} = B \left(\frac{\ell}{2} + z \right) \frac{dx}{dt} = B \left(\frac{\ell}{2} + z \right) v$$

となる。 V_u の正の向きは V_{emf} の正の向きの逆であるから、

$$V_{emf} = V_d - V_u = 2 B z v \quad (a)$$

となる。

問 5 浮上コイル L_0 の閉回路を一周したとき、外部磁場の磁束の変化に伴う誘導起電力が V_{emf} で、 L_0 を流れる電流の時間変化に伴う自己誘導起電力が $-L \frac{di_0}{dt}$ であるから、回路の式は、

$$V_{emf} - L \frac{di_0}{dt} - R i_0 = 0 \quad (b)$$

となる。この式は、導線中の平均的な電導電子にはたらく力のつりあいの式を、閉回路一周に亘って積分することによって導かれる。

式 (a) と式 (b) より、 $i_0(t)$ に対する方程式：

$$L \frac{di_0}{dt} + R i_0 - 2 B z v = 0 \quad (c)$$

を得る。この方程式の解き方については説明しないが、初期条件 $i_0(0) = 0$ を満たす解が、

$$i_0(t) = \frac{2 B z v}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \quad (1)$$

であることは、式 (1) を式 (c) に代入することによって確かめられる。

この後の $i_0(t)$ は、各時間帯での誘導起電力 V_{emf} が、

$$\Delta t < t < 3 \Delta t, \quad 4 \Delta t < t \quad \text{のとき} \quad V_{\text{emf}} = 0$$

$$3 \Delta t < t < 4 \Delta t \quad \text{のとき} \quad V_{\text{emf}} = -2 B z v$$

で与えられ、各時間帯のつなぎ目で誘導電流 i_0 が連続であることに注意して、回路の式 (b) を解けば、次のようになる。

$$\Delta t \leq t \leq 3 \Delta t \text{ のとき } i_0(t) = \frac{2 B z v}{R} (1 - e^{-\alpha}) e^{-\alpha \left(\frac{t}{t_0} - 1 \right)}$$

$$3 \Delta t \leq t \leq 4 \Delta t \text{ のとき } i_0(t) = \frac{2 B z v}{R} \left\{ (e^{\alpha} + e^{3\alpha} - 1) e^{-\alpha \frac{t}{t_0}} - 1 \right\}$$

$$4 \Delta t \leq t \quad \text{のとき } i_0(t) = \frac{2 B z v}{R} (e^{-\alpha} + e^{-3\alpha} - e^{-4\alpha} - 1) e^{-\alpha \left(\frac{t}{t_0} - 4 \right)}$$

ただし、 $\alpha = \frac{R}{L} \Delta t = \frac{R \ell}{L v}$ である。図 5 は、 $\alpha = 0.5$ の場合のグラフである。

問 6 左側の浮上コイル L_k と超電導コイル M の水平な辺を流れる電流 $i_k(t)$ と I の向きを、鉛直断面で見れば図 9-a のようになる。 M の上辺あるいは下辺にはたらく電磁力のうち、大きなもの 3 つの向きを矢印で表せば図のようになる。右側の浮上コイルと超電導コイルでも同様の図を得る。これらすべての電磁力をベクトルの的に足し合わせれば、合力の向きは鉛直上向きになる。

あるいは、各コイルを板状の磁石に置き換えて、向き合った面の磁極間の磁気力ベクトルを書き出し、その合力の鉛直成分が上向きになる、と説明してもよい。

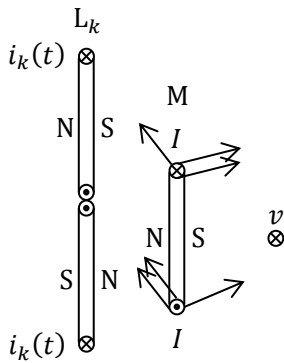


図 9-a

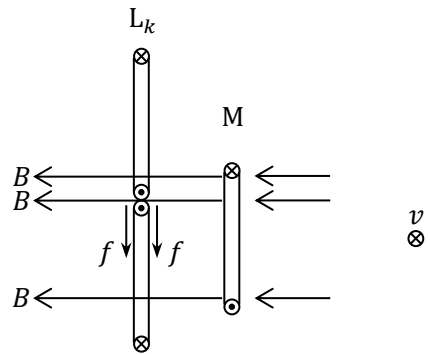


図 9-b

あるいは、次のように説明することもできる。

この問題では超電導コイルが作り出す近傍の磁場は、図 9-b のようになっていることを仮定している。よって、8 の字形のコイルの中央の 2 辺に電磁力がはたらく。フレミングの左手の法則より、その向きは鉛直下向きである。この力は、 M を流れる電流 I が磁場を介して L_k を流れる電流におよぼすのであるから、作用・反作用の法則より、浮上コイルを流れる電流は、超電導コイルを流れる電流に鉛直上向きの力をおよぼす。

問 7 答えは次のとおりである。

走行中のリニアカーには空気の抵抗力がはたらく。それが推進力を打ち消して、リニアカーにはたらく力の合力を 0 にするから。

高速で走行するときには、抵抗力は速度の 2 乗に比例する。したがって、速度が大きくなるほど加速が困難になる。抵抗力の比例係数は車体の流線形に依存する。車体の鼻は長いほどよいのだが、座席数との兼ね合いで、鼻の長さを決めているようである。

問 8 答えは次のとおりである。

式 (1) が示しているように、浮上力は $z v$ に比例する。 v が変化せずに浮上する (z が小さくなる) と、浮上力が小さくなる。そのため浮上力と重力の合力が下向きとなり、リニアカーは下向きに動く。

逆に、何らかの原因で、速度を変えることなく少し沈めば、合力が上向きとなり、リニアカーは上向きに動く。すなわち、上下にずれる運動に対して、リニアカーは自動的に安定機能をはたらかせるのである。

III

問 9 図 10 のように、 G_0 , G_r に矢印の向きに電流を流そうとする誘導起電力を正とする。図 4 に描かれた超電導コイル M が G_0 と G_r の間に進入してくると、ファラデーの法則より、 G_0 と G_r のどちらにも正の向きの誘導起電力が生じる。リニアカーが軌道の中心線上を走行するときには、 G_0 と G_r を貫く磁束密度の大きさは同じであるから、誘導起電力の大きさも同じになる。よって、両者をつなぐ導線には左右から同じ強さで電流を流そうとする力がはたらくので、つりあってしまい、閉回路 G に電流は流れない。

超電導コイルが G_0 と G_r の間から出ていくときには、負の誘導起電力が生じるが、上記と同じ理由で、閉回路 G に電流は流れない。

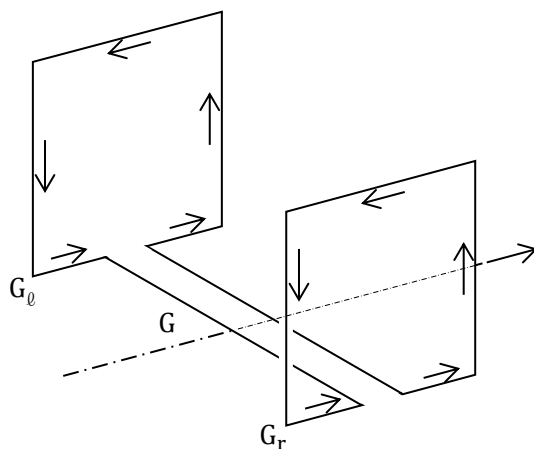


図 10

問 10 リニアカーが横ずれを起こし、たとえば、左側の超伝導コイル M_0 が G_0 に向かってある速さで近づいたとすると、 G_0 を左向きに貫く磁束が増加するので、 G_0 には正の向きの誘導起電力が生じる。このとき右側の超伝導コイル M_r は G_r から遠ざかるので、 G_r には負の向きの誘導起電力が生じる。その結果、閉回路 G に誘導電流が流れる。その向きは、 G_0 で正の向き、 G_r で負の向きになる。この誘導電流によって、 G_0 の M_0 に向き合う面に板状磁石の N 極が生じ、 M_0 の G_0 に向き合う面に生じている N 極に斥力を及ぼす。同様に、 G_r の M_r に向き合う面に板状磁石の N 極が生じ、 M_r の G_r に向き合う面に生じている板状磁石の S 極に引力をおよぼす。これらの力の合力がリニアカーをもとの走行路に戻す向きの力となる。

リニアカーが右向きに横ずれ運動を起こすときも同様である

超伝導コイルと案内コイルのあいだに生じる電磁誘導が両者の相対運動に起因するときには、電磁力はその相対運動を妨げる向きにはたらく。これをレンツの法則という。したがって、超伝導コイルが案内コイルに近づくときには斥力を受け、案内コイルから遠ざかるときには引力を受けるのは、レンツの法則からして当然の結果である。

この解答では、リニアカーの進行方向の速度成分が考慮されていない。それについては(補足説明 2) を見よ。

(補足説明 1)

実際の超電導リニアの推進コイルには、図 11 のような三相交流が流されている。U 相・V 相・W 相の各交流はたがいに位相が 120° ずれている。それらが流れるコイルは、図 12 のように、3 つが一組となって側壁に設置されている。コイルの導線を巻く方法には、集中巻と分布巻の 2 種類あるが、分布巻きの説明は長くなるので、ここでは集中巻とする。すなわち、隣り合うスロット (導線を巻く間隙) に 1 つのコイルを巻く。いくつかのスロットを跨いで 1 つのコイルを巻く方法を分布巻という。どちらの巻き方でも推進の原理は同じである。

図 12 の P は、軌道の左側壁の推進コイルで、図の矢印の向きの電流を正とする。推進コイルに向き合う 4 つ一組の超電導コイル M には、図の矢印の向きの電流 I が流れており、隣り合うコイルを流れる電流は逆向きである。推進コイルに重ねて描くと見づらくなるので、下にずらして描いてある。推進コイルの長さは d で、超電導コイルの長さは a であるから、 $6d = 4a$ の関係がある。

時刻 $t = 0$ のときに、図 11 に示された電流が推進コイルに流れると、超電導コイルに向き合う面に、図 12 の P と M の間に描かれた磁極が現れる。磁極の強さは電流に比例する。それをフォントの大きさと表している。

時間 $\Delta t = T/12$ (T は交流の周期) 経つごとに、磁極の強さの分布がどのように変化するかがその下に描かれている。これからわかるように、磁極の様子は右向きに移動する。コイルの巻き方が分布巻であれば、移動の様子がもう少し見やすくなる。模様は半周期に a だけ移動するので、その速さは、 $v = 2a/T = 3d/T$ である。超電導コイルを等価な板状磁石に置き換えたとき、推進コイルに向き合う面の磁極は、推進コイルから推進力を受ける。この力によって超電導コイルが磁極模様の移動に付いていくようになったとき、超電導リニアの速度が $3d/T$ になる。このとき、磁極模様と超電導コイルの移動速度が同期するので、このような推進装置をリニア三相同期モータという。

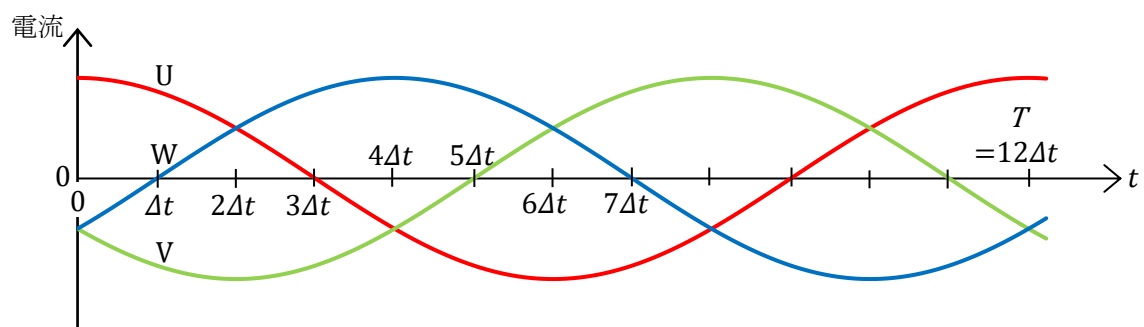


図 11

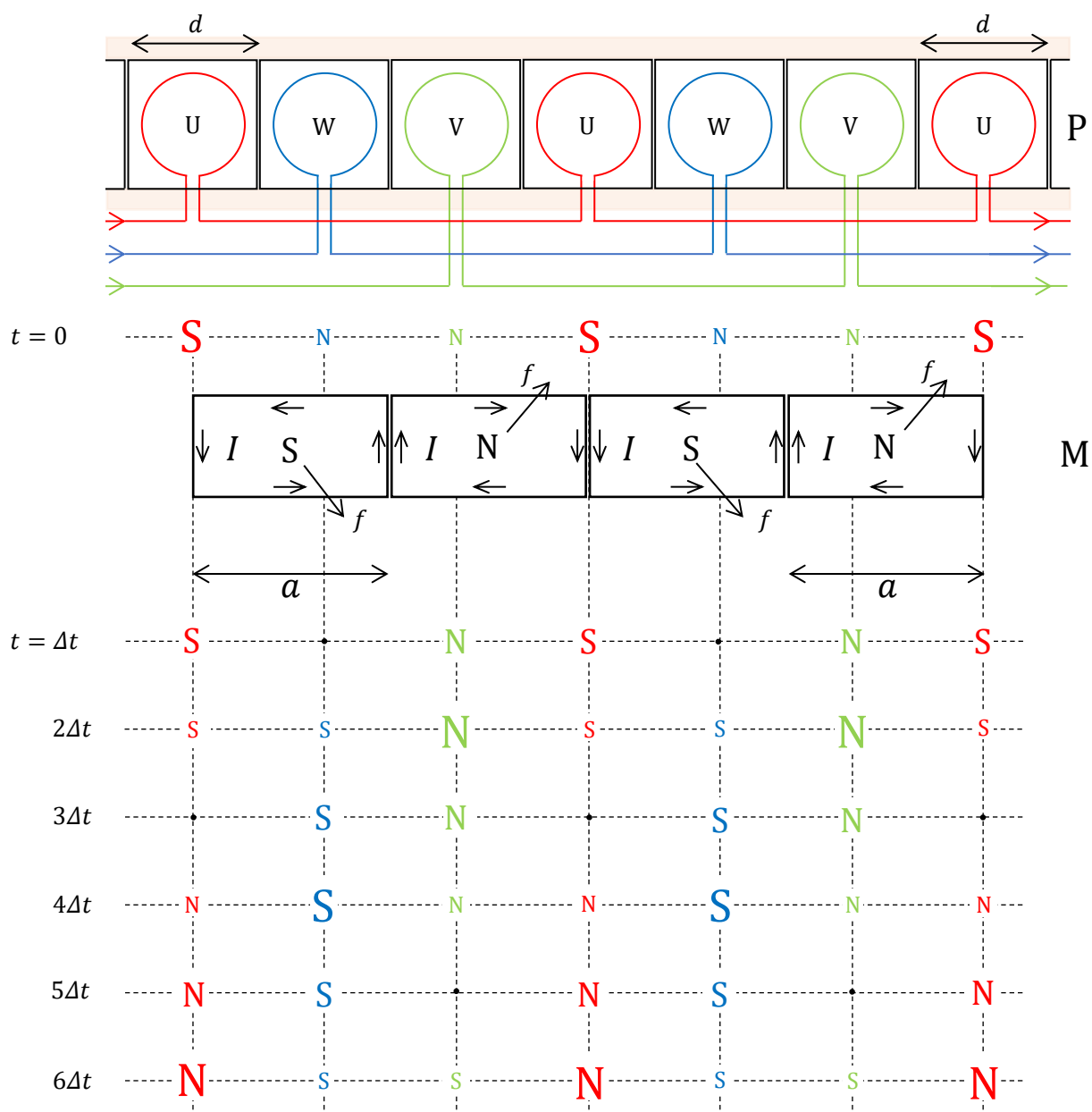


図 12

(補足説明 2)

問 10 の解答では、軌道の側壁に垂直な速度成分があることを想定している。そうでないと誘導起電力が生じない。ところが、実際に横ずれがあると、リニアカーの走行速度によって別の誘導起電力が生じ、リニアカーの横ずれ運動に影響する。それについて考えてみよう。

問 10 の解答で論じた横ずれ運動の結果、リニアカーが左側壁に最も近づいたときを考える。この瞬間、横ずれ運動の速さに起因する誘導起電力は 0 となる。このとき、案内コイルを貫く超伝導コイル M の磁束密度は、 G_0 の方が G_r より大きい。よって、 M の通過によって生じる誘導起電力は、 G_0 の方が G_r より大きい。したがって、図 13 の上半分に描かれているように、 M が G_0 と G_r の間に進入してきたときには、図に示された向きに電流が流れる。その結果、 G_0 と M の向かい合った面に板状磁石の N 極と N 極が生じ、両者の間に斥力がはたらく。一方、 G_r と M の向かい合った面には N 極と S 極が生じ、両者の間に引力がはたらく。これらの磁気力によって、リニアカーはもとの軌道に戻る向きの力を受ける。

ところが、図 13 の下半分に描かれているように、 M が G_0 と G_r の間から出ていくときには、誘導起電力も電流も磁気力もすべて逆向きになり、リニアカーは左側の側壁に近づく向きの力を受けることがある。

浮上原理で論じたように、長さ 3ℓ の超伝導コイルは、一般的に 4 つの案内コイルと向き合っており、2 番目と 3 番目のコイルには、自己誘導のために、先頭のコイルと同じ向きに電流が流れる。そのため、最後尾のコイルに逆向きの電流が流れることがあっても、これら 4 つ (左右合わせて 8 つ) の案内コイルがリニアカーにおよぼす合力の横成分 (進行方向に垂直な水平成分) は、もとの走行路に戻す向きにはたらく。

案内コイルが超伝導コイルにおよぼす実際の電磁力を求めるときには、2 つの速度成分を同時に考慮しなければならない。

