

磁気浮遊装置の制作

金野茂男

1. はじめに

今夏も、ロシアのウラジオストク市に5週間ほど滞在した。市の中心あたりに、昨年度訪れた気になる店があり、今回も早速その店に出向いた。この店は日本語流で言えば「ホビー・ショップ」に相当するのかもしれない。が、店名の日本語訳は「不思議な商品」となる。店内一杯に不思議で面白い展示品があった。品物は外国製が多そうであった。今回も興味深い商品を見つけた。写真1がそれである。著者の研究室の机の上での実演写真である。傾いた型の保持器の下で地球儀が中空に浮いているのである。この商品の紹介記事には「中空に浮かぶ地球儀」の文字が見え、原理に磁力を用いていると書いていた。著者はこのような商品を日本で一度も見ることがないので、是非とも購入したいと思ったが、価格が2400ルーブル(日本円で約1万円)と結構高価(ロシアの物価水準ではなをさら)であった。しばしのためらいがあったが、結局、後日、購入し、日本に持ち帰った。

この店で見た商品を参考に、昨年度は「癒しの振り子」なるものを作成した。商品では振り子が吊されている。振り子の先端が、下に置いてある平面上の粉の上を動き回り、おもしろいリサーチ図形を描き続けるという商品であった。頭に記憶したモデルを参考として、本学の学園祭の参加作品として、昨年10月に作成した。この「癒しの振り子」の制作論文は著者のURLでも既に公開済みである。

持ち帰ったこの装置は、電源はロシア仕様なのでAC200Vである。が、装置にはAD/DCアダプタが付属しており、AC200VをDC12Vとして装置に供給していた。日本仕様にするにはごくありふれたAC100V/DC12Vのアダプタを準備するだけであった。この装置を学生の前で実演すると、みんな感心していた。一人の学生として、この商品の存在を知らなかった様である。この「中空に浮かぶ地球儀」を、自作で復元することを思い立った。以下で話の都合上、この装置に一般的な固有名詞を付けよう。「磁気浮遊装置」としよう。というのは浮遊するのは必ずしも地球儀とは限らないからである。



写真1 中空に浮く地球儀



写真2 再構築した磁気浮遊装置

この磁気浮遊装置を是非とも自作復元したい。今回この課題に取り組んだ。3週間ほどで一応装置の制作に成功した。が、「復元」は正確とは言えないであろう。というのは、装置の地球儀、そして保持器(写真では傾いた型)の内部構造は調べてはいない。装置の動作状況、その他の試験から得られた知識をもとに、著者の考える保持器内の構造、地球儀内の構造を考え出し、それをもとに制作したからである。装置を分解していない。もし、「復元」に失敗したならば、装置を分解することは考えていた。が、結果として、分解をしなくても、「復元」することに成功したわけである。従って、制御方法、制御電子回路、その他に違いがあるであろうから、「復元」と言うよりは「再構築」というべきかもしれない。

早速、再構築した「磁気浮遊装置」を紹介する。写真2がそれである。木材で作った保持器、保持

器の上端に鉄ボルト入りソレノイドコイル、ソレノイドコイルの下には鉄ボルトにネオジウム磁石を固着させた浮遊物体がしっかりと空中浮遊している。電子制御回路部は支柱の根本にある。電源はAC100V/DC12Vアダプタで供給している。

なを、再構築に当たって、インターネット経由で磁気浮遊装置関係を検索してみた。プラズマなどの物理分野のサイトが多かった。著者自身は日本では見たことがなかった装置であったが、幾つかのサイトで同じような装置、を写真付きで通信販売していることがわかった。各サイトで紹介している装置の形状は様々であった。あるサイトでは磁気センサとコンピュータ（多分、マイクロコンピュータ）を用いて制御をしているとの紹介文があった。それ以上の機構についての紹介記事は全くなかった。

従って、インターネット経由での探索から、この装置の構造に関する詳しい情報は取得することができなかった。ただ、磁場をモニターし、制御はマイコンで行っているらしいとの点だけである。このような状況の下で、装置の再構築に取りかかった。

2. 購入した磁気浮遊装置の検査

再構築にあたっては、入手した磁気浮遊装置を分解・破壊することなく検査することから始めた。まず、地球儀（写真1）から調べた。質量48g、直径約9cm、表面には世界地図が描かれた紙が貼り付けてある。球は中空のプラスチックのようである。北極と南極にはプラスチック製の小さいデベソがある。磁力計で地球表面を探索してみた。北極の箇所には強い磁場を観測した。極はN極であり（まあ、地球の北極なので妥当な設定であろう）、磁力計のセンサを直付けで約2800Gの強度を観測した。他の地球表面には南極を含めて、何らの磁場も無い。この結果から、北極部にネオジウム永久磁石が埋め込まれているものと判断した。

保持器の外枠はアルミ板とプラスチック板（写真1）である。磁場が関係するので鉄板、トタン板などは使えなかったのであろう。保持器の地球儀がぶら下がるあたり（このあたりを吊す点と呼称しよう）も観察した。電源を切って、磁力計で吊す点付近を観察したが、磁場らしい磁場は観察されなかった。従って、吊す点には永久磁石は使用されていないと判断した。地球儀の永久磁石と相互作用して地球に浮力を与えるためには、この吊す点の上部アーム内には、軟鉄かコイルがあるはずと考えた。また、吊す点に永久磁石を近づけると永久磁石は吸引される。釘などの軟鉄を近づけても吸引されることはない。これらのことから、吊す点の上部アーム内には、鉄心入りコイルが鎮座しているものと判断した。軟鉄だけでは制御できないのは自明である。

地球儀には永久磁石のみが入っている。それもネオジウム磁石であろう。それならば、適当なネオジウム磁石で、地球儀の代用ができるのではなからうかと考えた。結果は正にその通りであった。写真3、4にそれを示す。ぶら下がる物体の磁力の大きさとその質量には相関関係が存在する。磁力が大きければ、安定してぶら下がるためには大きな質量が必要であり、逆に磁力が小さければ、小さな質量とする必要がある。試行錯誤して得られた結論では、余り重くても、余り軽くても安定した空中浮遊を実現することはできない。ほどほどと言うことである。多分この制限は上部アーム部分に鎮座している鉄心入りコイルの規格に依存していよう。また、写真1、3、4から見てとれようが、吊される物体の形状、重さなどに依存してであろうが、平衡状態で吊す点と物体との間隔に相違がある。



写真3 ネオ磁石×4個+太いボルト



写真4 ネオ磁石+細いボルト+鉛板の錘

写真3ではネオ磁石（1枚 円形、直径15mm、厚さ3mm、質量5.1g）の面で磁界強度は約4800G、全質量は50g、写真4では磁界強度は3100G、全質量は36gであった。この例ではネオ磁石+ボルトの質量だけでは平衡を維持させることが困難であった。鉛の錘を付加してようやく平衡を実現している。地球儀以外の物体でも空中浮遊させることができた。これで、再構築の1つの課題は済んだ。思うに、この地球儀以外にも、磁石付きのボルトを、人形、UFO、飛行機などに埋め込めば、おもしろい展示となりそうである。

写真3, 4で示した結果も頭に入れ、中空で地球儀が安定・静止する力の関係を、次の様に推理した。図1にそれを示す。地球儀には、重力が下向きに、磁場による引力が上向きに作用していよう。平衡状態ならば、重力=引力となる（図中央）。何かの外乱などで地球儀が平衡状態から下がる（図左）と、上部アーム内にあるコイルに流れる電流を大きくし、引力を重力より大きくすれば、地球儀は引き上げられる。一方、逆に地球儀が平衡状態から上がる（図右）と、コイルに流れる電流を小さくし、引力を重力より小さくすれば、地球儀は下がる。地球儀がどのような位置にいるかは上部アームの吊す点付近に取り付けているであろう磁気センサ（ホールセンサ）で磁界強度Bを測定していればわかるであろう。地球儀が下がり過ぎれば、Bは小さくなり、上がり過ぎれば、Bは大きくなる。Bを常時測定し、その測定値に対応させて、コイルに流す電流を制御できれば良さそうである。

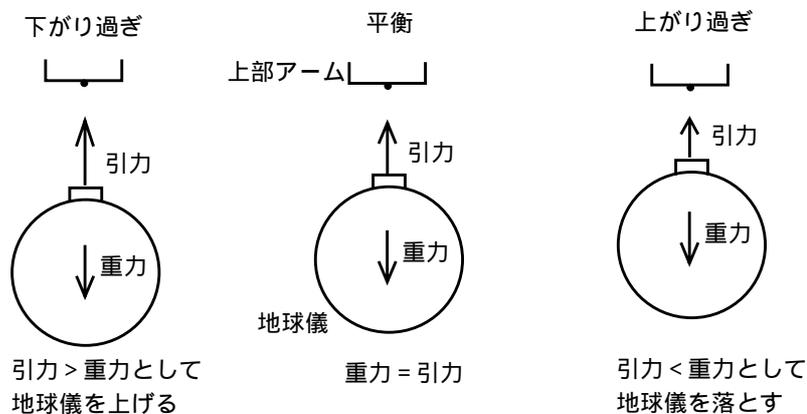


図1 推理した引力と重力の関係

ところで、上部アーム内には、鉄心入りのコイルが入っていると推論している。地球儀内のネオジウム永久磁石と、この鉄心入りコイルとの間に作用する磁気力には2種類あることに気を付ける必要がある。図2で、それを示す。通常経験することであるが、鉄自体は磁化していないくても、それに磁石を近づけると、磁化する。つまり磁石となる。上部アーム内にあるであろう鉄心入りコイルに電流が流れていなくても、鉄心の、この作用により、永久磁石が内蔵されている地球儀が近づくと、鉄心は磁化し、地球儀を引きつけることになる。実際、この磁気浮遊装置に電源を入れない状態で、吊す点に地球儀を近づけると、吊す点に引きつけられる。この引力を F_m としよう。一方、コイルは、それに電流を流すことで磁石としての作用を持つ。鉄心入りコイルに、電流で誘起される磁化で磁気力が発生する。この力を F_c としよう。この2つの合力 $F_m + F_c = F$ が地球儀の重力 W と対峙する。

- (1) 平衡状態にあれば、 $F = W$ である。
- (2) 平衡状態から下れば、距離が離れるので当然 F_m は小さくなる。地球儀を引き上げるためには、 F_m の減少分も賄うように、 F_c を大きくする必要がある。つまり、電流を大きくする。
- (3) 平衡状態から上れば、距離が近づくので当然 F_m は大きくなる。地球儀を引き下ろすためには、 F_m の増加分も減らすように、 F_c を小さくする必要がある。つまり、電流を小さくする。

このようにコイル電流を制御するためには、平衡状態で、ある一定の電流(I_c)をコイルに流しておく方法が採用できよう。地球儀が下がりすぎれば、 $I > I_c$ として、引力 F を大とする。逆に上がりすぎれば、 $I < I_c$ として、引力 F を小とする。

購入した磁気浮遊装置を動作させ、回路に流れる消費電流を調べてみた。地球儀が空中浮遊している平衡状態では一定(ただし微小に変動をし続ける)の電流が流れ続けている。地球儀を強制的に下げると、電流は急激に大きくなっていく。逆に、地球儀を強制的に持ち上げると、電流は急激に小さくなり、アイドリング電流だけが流れているように見えた。これらの結果は上の判断を裏付けるものと考えた。

地球儀で、北極の部分に円形のネオジウム磁石だけを取り付けているというのは、安定性からみると都合が悪そうである。地球儀に作用している下向きの重力に対して、吊す点からの磁場による上向

きの引力との釣合で地球儀は浮いていると判断している。薄型円形磁石では通常、近接している表裏にN, S極がある。上部アーム内にあるコイルとの相互作用で、このうちのN極が吊す点に引かれる。一方、このままでは近傍しているS極は同程度の斥力を受けるはずである。地球儀には重力も作用している。地球儀で、引力の作用点と重力の作用点は離れていた方が安定性がよい。また、円盤形のネオジウム磁石を用いた場合、磁石の北極のN極と対になっているS極は極力N極と離れていた方がよい。そうすれば、N極に作用する引力 >> S極に作用する斥力 となるからである。図3にこれらのことを図解しておく。写真3, 4に示したネオジウム磁石+ボルトの吊される物体は、この両者を満足している。多分、地球儀内にも、ネオジウム磁石に軟鉄などを固着させているものと思われる。

なを、図3の右に図解しているように、棒磁石型ネオジウム磁石も考えられる。が、ネオジウム磁石は希少金属原料を使用している故か、結構値段が高い。棒磁石ではなく、円盤磁石に軟鉄棒を貼り付ければ、一応棒磁石の役は果たす。無理に、棒磁石とすることは費用の面から見ると、得策ではない。

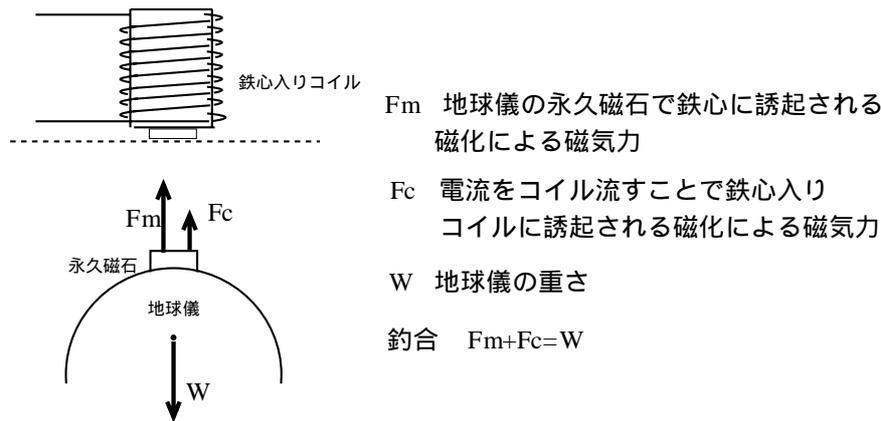


図2 地球儀と鉄心入りコイルの間に作用する2種類の磁気力

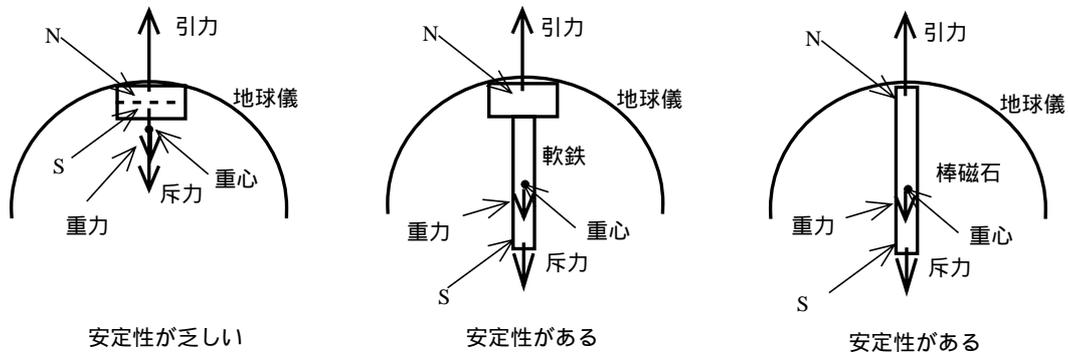


図3 地球儀内の磁石の配置と軟鉄の錘 (推論)

以上の考察なども基礎として、磁気浮遊装置の特性試験より得られた結果とともに、地球儀以外の物体の釣り下げ実験を行った。写真3, 4が、その結果の例である。また、磁気浮遊装置へのDC電圧の大小、電流、吊す点近傍での磁界強度なども調べた。その結果を図4に示している。

電圧源として可変直流電源を用いた。購入時、付属していたAD/DCアダプタは12V出力であった。この浮遊装置では電源電圧はDC12Vにこだわることはないことがわかった。DC + 5V ~ + 20Vの間で安定に動作する。吊す点であるA点付近に磁束計のセンサ部を固定して、磁束密度の測定も行った。が、得られた値は概値と見た方がよい。センサの少しの位置の違いで、大きく値が異なるからである。

上部アームの下に、何も置かなかつた場合、地球儀を置いた場合、「ネオジウム磁石+ボルト」の組み合わせ2例、について調べている。調べたデータは加電圧、電流、A点(吊す点)での磁界強度である。詳細は図4を見て読んでほしい。一応の結果を羅列すると以下の通りである。

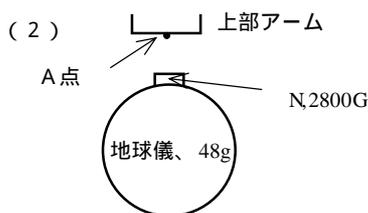
- (1) 加電圧は+5V ~ +20Vまでにおいて、装置は安定して動作した。
- (2) 加電圧が小さいと大きな電流が、加電圧が大きいと小さい電流が消費される。

- (3) 加電圧の大小にかかわらず、地球儀が平衡位置にいれば、A点での磁界強度はどの場合でもほぼ同じ値である。
- (4) 釣合状態から地球儀を無理矢理手で下に引き下げると、急激に電流が増大した。最大で約600mA。
- (5) 逆に、上に持ち上げると、急激に電流は減少し、アイドリング電流程度となった。



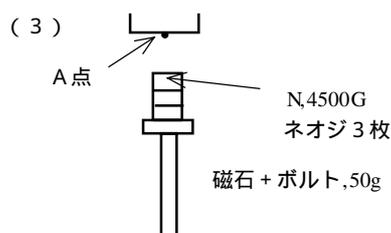
地球儀なし

DC電圧 (V)	電流 (mA)	A点の磁場
20	31	ほぼ0G
15	28	ほぼ0G
10	22	ほぼ0G
5	14	ほぼ0G



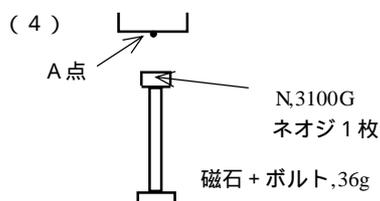
DC電圧 (V)	電流 (mA)	A点の磁場
20	76 ~ 79で小刻みに変動	S, 640G
15	88 ~ 89 同上	S, 640G
10	106 ~ 108 同上	S, 640G
5	175 ~ 178 同上	S, 640G
4	落下	

釣り合いの状態、物体を手で支えて、電源を切ったときのA点の磁場 S, 570G
よってコイルによる磁場 S, 130G



DC電圧 (V)	電流 (mA)	A点の磁場
20	75 ~ 79で小刻みに変動	S, 640G
15	86 ~ 88 同上	S, 640G
10	103 ~ 105 同上	S, 640G
5	171 ~ 173 同上	S, 640G
4	落下	

釣り合いの状態、物体を手で支えて、電源を切ったときのA点の磁場 S, 570G
よってコイルによる磁場 S, 70G



DC電圧 (V)	電流 (mA)	A点の磁場
20	55 ~ 57で小刻みに変動	S, 660G
15	58 ~ 60 同上	S, 660G
10	74 ~ 76 同上	S, 660G
5	129 ~ 134 同上	S, 660G
4	落下	

釣り合いの状態、物体を手で支えて、電源を切ったときのA点の磁場 S, 570G
よってコイルによる磁場 S, 90G

錘の3通りにおいて、釣合の状態から強制的に手で、錘を上下に移動させてみた。3通り全てで同じような結果が得られた。電圧はDC10Vに固定。下に引き下げたとき、上への吸引力が作用するとともに、電流も増大し、600mAで飽和した。上に引き上げたとき下への反発力は余り感じられないが、少し上げただけで電流は急速に低下し、24mAで飽和した。この値は錘をおかなかったときの装置のアイドリング電流値に近い。

図4 浮遊装置の各種試験結果

3. 制作

浮遊する地球儀の代用品を見つけ出すことに成功した。次の課題は上部アーム内に内蔵されていると考えている鉄心入りソレノイドコイル(今後、簡単にコイルと呼称しよう)の再構築である。図4に示しているデータからわかるように、磁気浮遊装置では定常で100mA前後、最大で600mA当たりの電流を流している。これだけの容量のリレースイッチを探した。リレースイッチを分解し、鉄心入りソレノイド部分を引き出して、使用しようと考えたからである。探し出した最大のものは駆動電圧DC12V、電流160mAのものであった。写真5, 6にその外観を示している。写真5は

購入時の外観、写真6は中のソレノイドコイルを取り出し、自作の保持装置に取り付けたときの外観である。その他に、自前でも幾つかのコイルを作成した。これについての詳細は後述しよう。

当面、ここではDC 12V, 160mAのコイルを使用しての、コイル部の再構築の話を行う。リレースイッチの種類は多い。が多くは5V、数十mA駆動である。図4の調査結果からわかるように、数百mA近くの電流を流せるリレースイッチがほしかったが、探して見つけたのが160mAであった。当面、致し方がない。このコイルを用いて、浮遊実現実験を開始した。結果論であるが、市販のリレースイッチを入手し、使用する必要はない。自作のコイルで装置の再構築が行えるからである。従って、入手し、使用したリレースイッチについて詳細には述べない。

図5に空中浮遊試験装置の概略図を示している。コイルには可変直流電源を接続する。コイルに流すべき電流の向きであるが、地球儀の北極がN極となっている。従って、コイル下面がS極となるように流せばよい。コイルはスタンドで空中の一定位置に固定保持する。ぶら下げる物体には、実験の不確定性を小さくするために、当面、地球儀を用いる。コイルと地球儀の間には、木製の押し止め板を、これもスタンドで空中の位置に保持する。コイルと押し止め板の間隔は写真1で示している磁気浮遊装置に合わせて、10mm~15mm程度とする。地球儀はラボジャッキの上に置いた茶碗に乗せておく。試験中には地球儀は頻繁に落下する。その受け皿である。最初、DC電源をオフとしておく。このような配置状態としてラボジャッキを徐々に上げていくと地球儀も上がっていく。地球儀の北極が押し止め板に近づいてくると、電源がオフ、従ってコイルの電流が流れていないのであるが、突然、地球儀は茶碗から浮き上がり、押し止め板に当たって宙ぶらりんとなる。地球儀内の永久磁石とコイル内の鉄心の相互作用により、地球儀がコイルに引き上げられる。このようになるように間隔も調整する。この状態を何度か試しておく。



写真5 浮遊試験に使用したリレー



写真6 リレーから取り出したコイル部

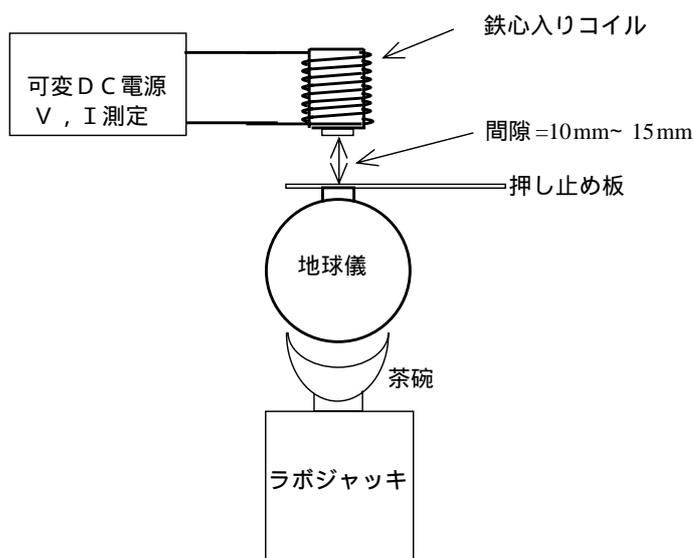


図5 空中浮遊試験装置

次に、ラボジャッキを少し下げ、手で、押し止め板から地球儀を引き離し、茶碗に落とし入れておく。従って、ラボジャッキは低くなっているのに、地球儀は引き上げられないで、茶碗に収まったままである。このような配置で、DC電源をオンとする。100mA～150mA程度の電流をコイルに流しておき、ラボジャッキを徐々に上げ、地球儀を押し上げていく。そのうちに、同じように、茶碗を飛び出し、押し止め板にぶら下がる。この場合は、コイルに電流が流れているので、コイル電流分による磁界の引力も地球儀に作用している。従って、DC電源の電流を下げていくと、地球儀は落下する。逆に、DC電源の電流を上げると、地球儀にはコイルによる引力が作用するので、再び押し止め板にぶら下がる。試験装置を適宜に調整し、地球儀の上昇、落下が電流の大小で繰り返されることを確認する。

これらのことは、コイルに流す電流量の大小を制御することで、地球儀に働く引力を大小させることができることになるので、地球儀の位置状態情報（コイルの先端に取り付ける磁気センサーから取得する）を、コイル電流に、調子よくフィードバックできれば、位置の上下、磁界強度の大小、電流の大小、引力の大小、位置の上下、磁界強度の大小……のフィードバックから、地球儀をうまく具合に、ある一定位置で保持できそうなことを予想させる。これらの相関関係を図にしたのが図6である。

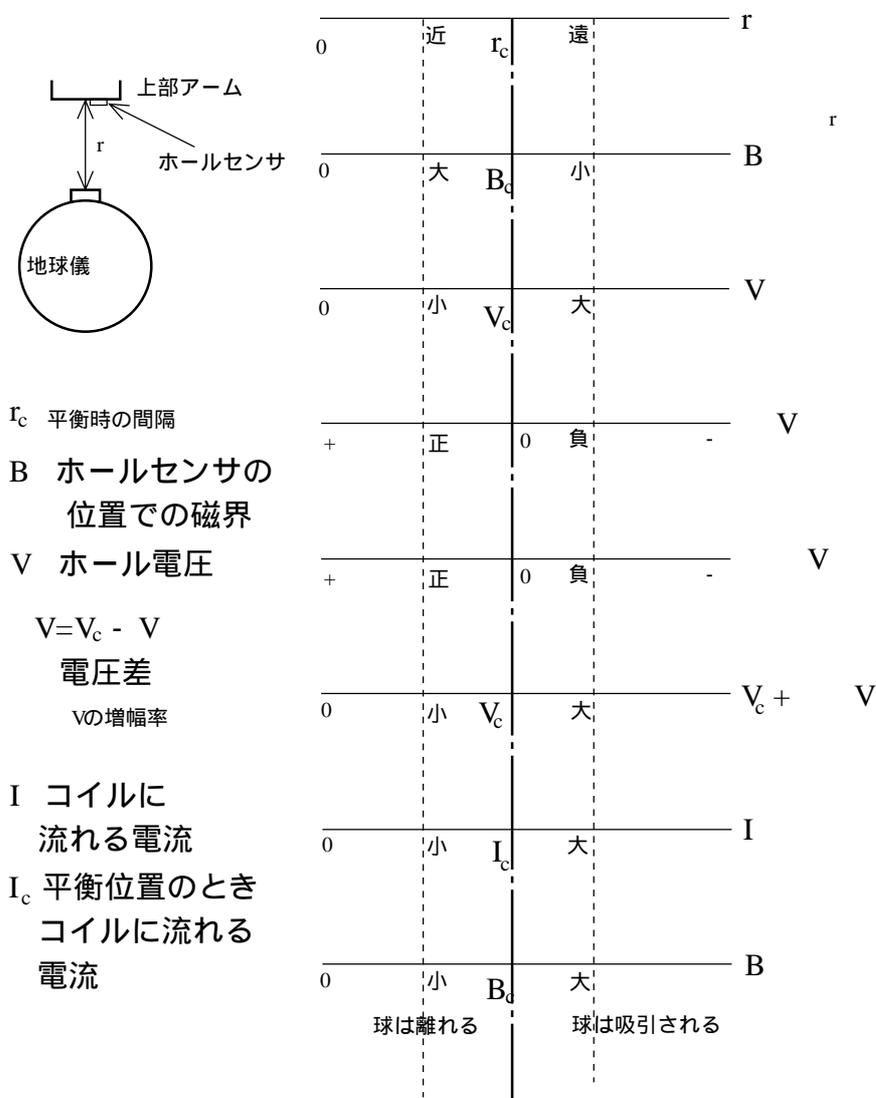
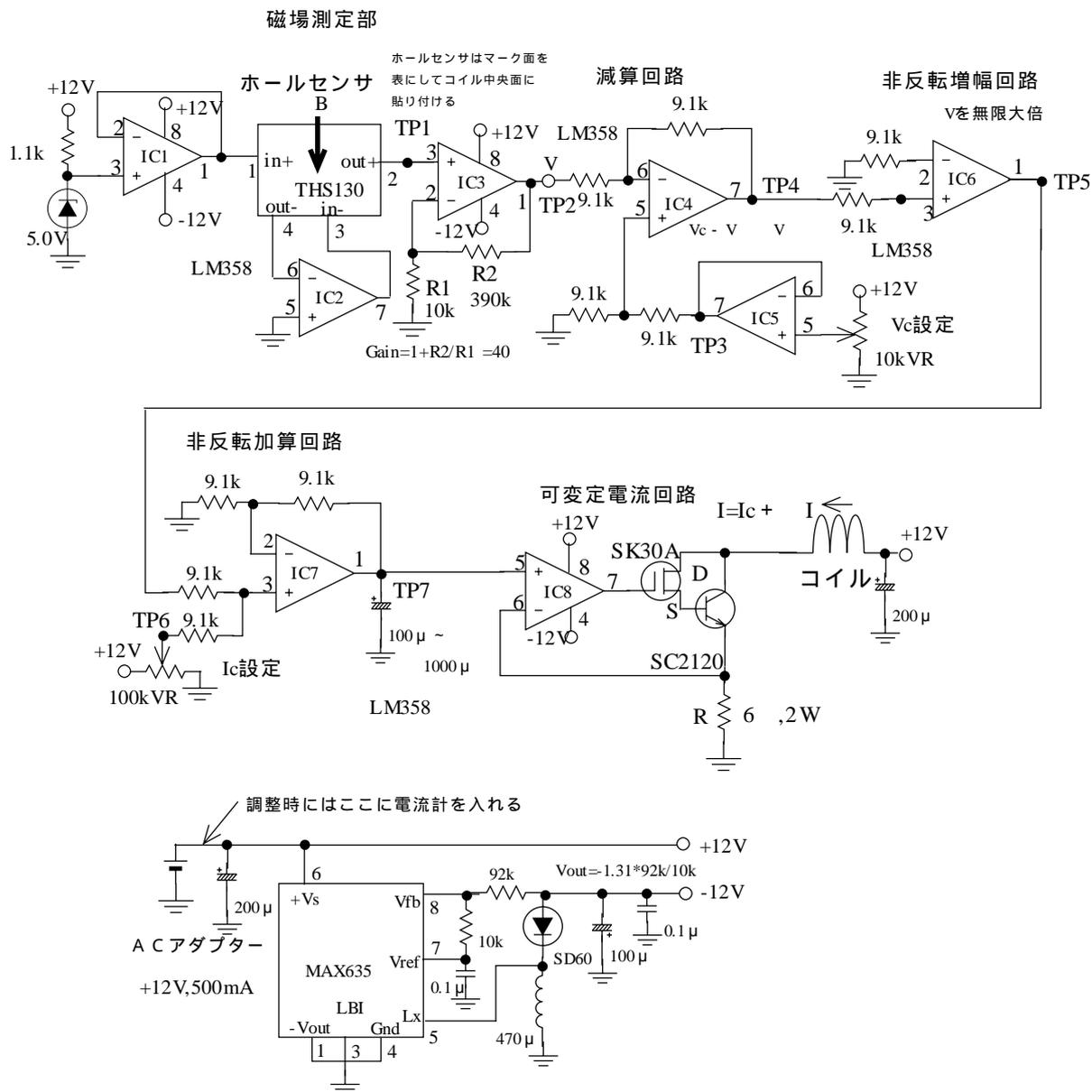


図6 地球儀の位置 ホールセンサ コイル電流間の相関関係図



磁気浮遊装置の動作分析、調査などの予備実験、図5に示した試験装置からの知見などをもとに、制御回路の設計制作に取りかかった。何度かの失敗を繰り返しながらも、一応、磁気浮遊を実現できる回路に達した。図7がそれである。

IC1, IC2はホールセンサ(THS130 東芝製 大きさ 4.0mm×2.3mm×1.2mm(端子部をのぞく))を用いた磁場測定部である⁽¹⁾。ホールセンサは試験中にはセロテープでコイル下面中央部に貼り付けたが、最終的には2液型アラルダイト接着剤で接着した。

ホールセンサからの出力電圧は、テクニカルノートによれば、ホールセンサ制御電圧を+5Vとしたとき、磁界強度が0Gで0V, 1000Gで200mVである。IC3で数Vまで増幅する。IC4, IC5は減算回路である。地球儀が平衡位置にあるとき、ホールセンサが検出する磁界強度 B_c とする。IC3から電圧 V_c が出力される。 V_c 設定10kVRで、減算電圧をこの V_c に設定しておけば、地球儀の位置変動に伴って、IC3から出力される電圧 V は変化するが、IC4からは、常に V_c と V の差、即ち $V = V_c - V$ は出力される。オシロスコープがあれば、TP2とTP3を2チャンネルモードで同時に観測してみる。平衡状態が実現できそうな、或いは実現できているときには、

この2カ所の電圧は同じ値となっている。

地球儀が上がりすぎれば、 B は大きくなる、従って V も大きくなる。よって、 $V < 0$ 、逆に、地球儀が下がりすぎれば、 B は小さくなる、従って V は小さくなる。よって、 $V > 0$ 。この V をコンパレータ出力させた。非反転で利得無限の回路を通した。 $IC6$ がそれである。当初、この V を可変抵抗で何倍かに増幅していた(OPアンプ回路なので)が、よりよい安定性を探していたら、何倍かではなく無限大でもかまわないことがわかった(本回路では)。部品数も少なくなるから、可変抵抗を取り外した。つまり抵抗は無限大となるので、利得も無限大ということになった。

$IC7$ は加算回路である。コイルに流す電流を $IC7$ に入力してくる電圧で制御する。地球儀が平衡位置に位置するとき、一定の電流 I_c がコイルに流れている。この I_c は 100 kVR で設定する。 $IC8$ はFET, SCトランジスタ、コイルとともに、電圧 電流変換回路⁽²⁾を形成している。従って、 100 kVR を調整すると言うことは、 I_c を設定することとなる。 I_c の設定は任意であるが、TP5をアースとして、 I_c 設定 100 kVR を動かし、まず、回路電流が最低値から最高値までを調べ出す。例えば本装置では、 $30\text{ mA} \sim 250\text{ mA}$ であった(ただし、これは使用するコイルで変わる)。 100 kVR を調整し、 I_c 100 mA あたりとしておく。

回路図の下の回路は -12 V 供給用の回路である。DC-DCコンバータICであるMAX635を使用している。作り上げたハード回路の外観は写真7に示している。右端のICがMAX635である。それから順に、LM358が並んでいる。



写真7 制御電子回路の外観

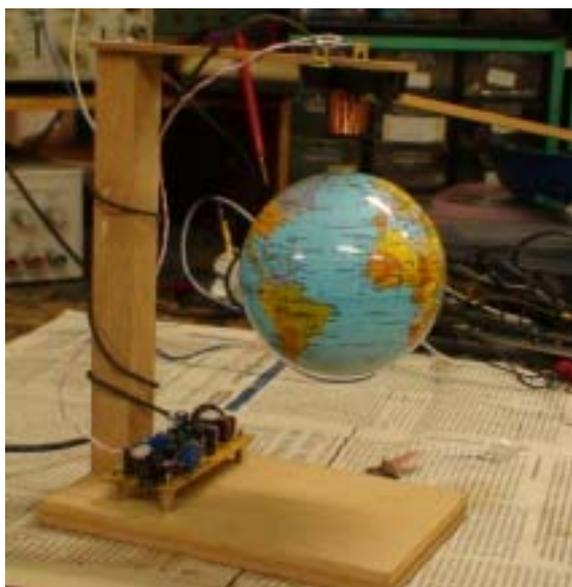


写真8 磁気浮遊の実現



写真9 コイルと北極との間

図7の回路を作成し、木材で保持装置を作成した。上部の梁に、コイルを取り付けた。ぶら下げるものとして、地球儀を用いた。図4に示しているデータ等を考慮しながら、それほど難しくなく、地球儀の浮遊に成功した。写真8がそれである。ソレノイドと基板との間には2本の線が引き渡している。ホールセンサ用線と、コイル用線である。写真9は空中浮遊している地球儀とそれを見事に保持しているコイルとの間隙の様子である。コイルの下面中央にホールセンサが固着されている。

リレーから取り出したコイルで、磁気浮遊が実現できた。これに、気をよくして、自前で巻き上げたコイルでも磁気浮遊ができるであろうとの確信を持った。必要容量の既製品のリレーが何時でも、何処でも入手できるわけではない。今回使用しているリレーは容量は希望には足りないが、探し出した中で一番容量が大きかっただけである。秋葉原でジャンク品として、偶然見つけたものである。自前で巻き上げられるコイルならば、読者でも、コイル線があれば、自由に復元作り上げることできる。

早速、自前のコイルの作成に取りかかった。写真10に、最初に巻き上げたコイル2例を示している。ともに、鉄心は在り合わせの3.5寸の釘、コイルはウレタン線0.25mmを選択し、抵抗値20分として9.8g。コイルの両側フランジは適当な厚さの厚紙である。巻き幅は左が18mm、右が9mmである。この2つを写真8で示している装置に、コイルとして取り付けた。ともに空中浮遊させることができた。が、写真8の場合と比較すると、許容平衡位置幅が狭いように感じた。外乱等により、相対的に平衡状態が崩れ安いと感じた。しかし、手巻きコイルでもやれると言うことが確認できたので、もう少しましな自作コイルを作成した。

写真11~13にその制作過程を示す。写真11が材料である。コイルはウレタン線0.25mm、抵抗値60分として29.4g。鉄心として、6mm x 30mm軟鉄ボルト。フランジとして25mm厚紙が2枚。ボルトに厚紙を差し入れ、アラルダイトで接着する(写真12)。ボルトのコイルを巻き付ける雄ねじ部分にも接着剤を塗っておいた方がよい。鋭角のピッチでコイルが傷つくの予防できる。またフランジから突き出た雄ねじ部分はコイルを巻くとき、ボール盤のチャックに噛ませることができて便利である。コイル巻きはボール盤を使用すると、早く便利である。突き出た雄ねじ部分は保持器の上部アーム部分にうまい具合、ナットで固定することもできる。写真13が巻き上げ完了の状態である。



写真10 自作コイル その1, 2

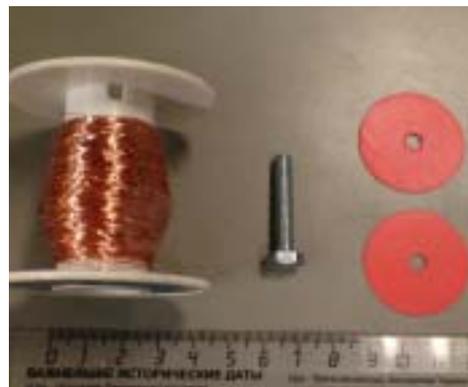


写真11 自作コイル その3 - 1 / 3

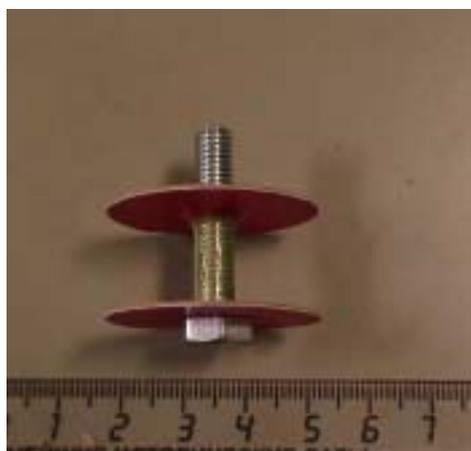


写真12 自作コイル その3 - 2 / 3

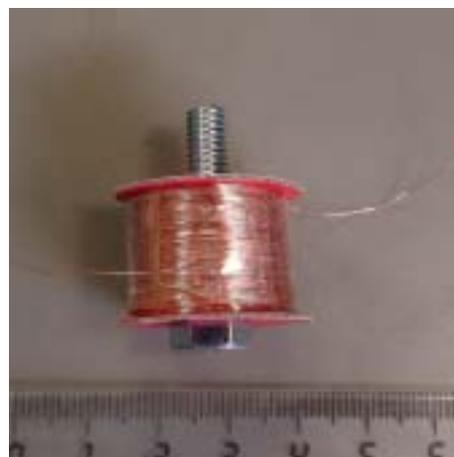


写真13 自作コイル その3 - 3 / 3

写真8で示している装置で、コイルをこの新しいものに取り替えた。写真14～16に各種物体の浮遊状態を示している。吊されている物体の大凡のパラメータなどは図4に記述している。先の自作コイルより安定性は高そうである。写真17は間隙部の拡大である。ホールセンサはコイル下面に接着している。接着剤を厚盛りとし、吊される物体がコイルに衝突するときの衝撃吸収剤の役割を持たせている。コイルのコアにボルトを使用しているので、うまい具合に上部梁に取り付けが行えている。変更も容易である。

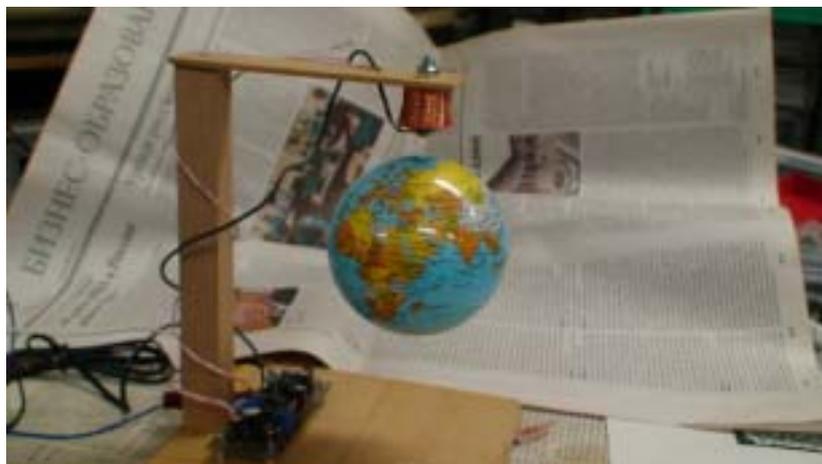


写真14 浮遊例1



写真15 浮遊例2



写真16 浮遊例3

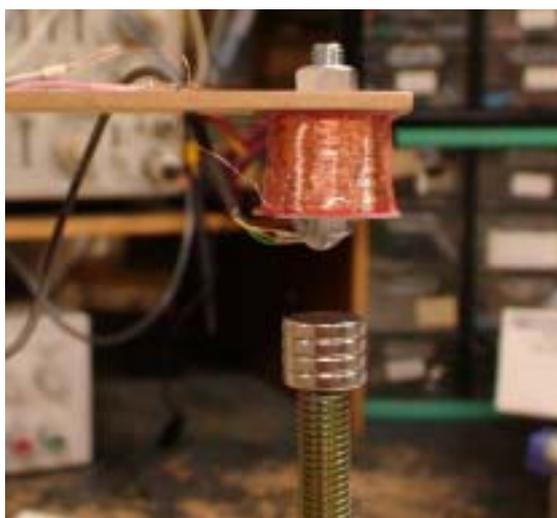


写真 1 7 間隙部

4 . 調整及び動作状況

本装置を制作復元したい読者のことを考えて、図7で示した回路図、写真13で示している自作コイル、写真14等で示している保持器での本磁気浮遊装置の調整の仕方を以下で述べる。保持器は特に図面を書いていない。写真を参考にして木材などで適当に加工すれば良いであろうし、中古の電気スタンドなどは代用品として使えよう。装置に初めて電源を入れる前に、図7の回路図の下の電源部分の書き入れている「調整時にはここに電流計を入れること」に従って電流計を入れる。電流計は0～1Aのレンジでよい。自前の電流計付きDC電源を持っているならば、最初はそれを用いて電源を供給する方が便利である。調整が済んだら、AC/DCAダブタにすればよい。

読者は地球儀を持っていないはずであるから、ぶら下げる物体としては図4或いは写真15, 16で示している「円形ネオジウム+ボルト」が好都合であろう。必ずしもそれらの全てを合致させる必要はない。本論文で紹介している程度内の物体、質量、磁力としておけば良いであろう。うまい具合に磁気浮遊が確認できれば、ぶら下がる物体の変種を作り出すのは困難ではない。

- (1) V_c 設定 10 kVR は当初は中間当たりとしておいて良い。物体が平衡位置に位置しているとき、ホールセンサが磁場を感知し、電圧 V_c として磁場測定回路から出力される電圧値に対応する。
- (2) 電源オフの状態、物体を手で支えながら、コイルに下からゆっくり近づけていく。と、ある距離まで近づくと、物体が磁力で引き上げられる。これは、図2を利用して説明すれば、今、 $F_c = 0$ なので、物体にかかる力は F_m と W である。ある間隔以内ならば $F_m > W$ となるからである。このときの位置を大まかに覚えておいた方がよい。物体が平衡動作になったときには、 $F_c > 0$ となるので、装置の動作中は平衡位置はその位置より下になることがわかっていく。
- (3) 物体を一端、脇に置き、電源をオンとし、+12V を供給する。本回路仕様では、回路電流は最大で 2 百数十 mA 流れる。
- (4) TP5 をアースし、電流値を見る。一応、100 mA 前後となるように、 I_c 設定 100 kVR を調整する。平衡状態時に、コイルを流れる電流を設定していることになる。
- (5) TP5 のアースを終了する。物体をコイルの下の先ほど当たりの位置に持ってくる。このとき注意してほしいのは、いたずらにコイルに近づけすぎると、急激に、強い力で物体がコイルに引き寄せられ、強い衝撃でコイルと衝突をすることがよくあるということ。このようなことはない方がよい。先ほどの位置当たりで、物体を上下してみると、物体が何となく無重力状態になるような箇所がある。その位置から物体を下へ引き降ろすと上向きの力を感じ、その位置から上へ引き揚げると地球儀に引力も重力も作用していないように感じられるようになる。手をゆっくりと物体から放すと、中空に物体は浮いたままとなる!!! 最初からこうなればしめたものであるが。

(6) 物体がコイル下面に接触しているとき、最低電流が50mA(おおざっぱでよい)、物体を遠ざけたとき、最大電流が200mA以上(これもおおざっぱでよい)となるように、Vc設定10kVRを荒く調整しておく。Vcの微調整はその後行うこととなる。

(7) Vc設定10kVRを大きくしたり、小さくしたりして、手にしている物体が中空に保持されるように調整を続ける。10kVRは最初はおおざっぱに、決めるときは少しづつ動かす。物体が平衡位置当たりから頻りに落下するようならば、コイル電流が足りないので、Vcが大きくなるようにする。頻りにコイルの引きつけられるようならば、コイル電流が大きすぎるので、Vcが小さくなるようにする。片手で物体を平衡位置に保持し、他方の手に時計ドライバを持ち、Vc設定10kVRを回せば、調整が容易である。

(8) 一応中空に浮遊させても、本装置では許容平衡位置範囲が狭い(最大電流量が小さい)。空気の揺らぎ、台の振動などで、物体はそのうちに落下するか、コイルに引きつけられる場合も多い。落下するならば、Icを少し上げる。吸引されるならば、Icを少し下げる。

(9) 10kVR, 100kVRを交互に調整し、安定性の強化を図る。

(10) 長時間平衡状態が維持できる場合もあるし、短時間で終わる場合もある。外乱等を極力除去すれば、長時間平衡状態を維持できよう。場合によっては、平衡状態になっている物体を観察すると、共振現象が見られる。最初は小さい上下振動であったが、次第に振幅が大きくなり、最後には、平衡状態が維持できなくなり、物体は落下するか、コイルに吸引される。このような場合には、Vc設定10kVRの微調整、或いは吊す物体の重さの微調整、吊す物体へ装着する磁石の強度の変更などで解決できそうである。

5. 改良など

本装置の改良、変更などについて思いつくことを羅列しよう。

(1) 本装置は物体が落下すると、最大回路電流が流れ、物体がコイルの吸引されると最小回路電流が流れる回路仕様となっている。参考品は物体が落下した場合でも、回路電流は最小となるようになっている。本装置を電源を入れたままで、長時間放置することは勧められない。参考品でもそうであるが、物体の平衡状態の散乱要因はいくらでもあり、目の前で安定したから、永久に安定とは限らない。本装置の回路仕様ならば、長らく目を離す場合には、電源をオフとすることを勧める。これでは面倒なので、改良案を提示しよう。

物体の真下の台の上に、物体の落下で作動するような(マイクロ)スイッチ機構を設け、電源スイッチをオン/オフさせることで簡単に対応できよう。

(2) 参考品では最高回路電流は600mA以上、本作品では200mA以上と3倍も異なっている。参考品の平衡位置範囲は結構広い上に、平衡位置から物体を無理に引き離れた場合の吸引力も大きい。これは回路電流の大小の差であろう。本回路の定電流回路仕様では200mA以上の電流を流すのは無理そうである。トランジスタも結構発熱している。

トランジスタを他の大きなものに交換し、コイル抵抗も小さくすれば、最大回路電流を大きくできると思う。テストボードで、大きなトランジスタと、小さな抵抗値のコイルを用いて、電圧-電流変換回路部を試験してみた。使用した電源の制限もあったが、500mA以上は流せそうである。

(3) 本回路では、-12VをDC/DCコンバータ専用ICであるMAX635を使用して供給している。実は、このICは1個3000円~4000円と結構高価である。著者の研究室には少なくとも蓄えがあるので、頻りに利用している便利なICなのであるが。

DC+12Vは、ごくありふれたAC/DC12Vアダプターを用いて供給している。ジャンク品ならば100円でも買えよう。格安で、本回路を制作する場合、この同じアダプタを2個準備すればよい。残りのアダプタで-12Vを供給する。電源コード系が2つとなるが、お金には換えられない人向けである。図8の通りにすれば良いであろう。こうすれば、図7の-12V供給部分は不要となる。

(4) 現在、同型の次の装置の試作を開始している。吊す物体の上下の共振現象が顕著な場合もある。今のところVc設定10kVRで対応できているが、対処療法できな方法である。本質的な解決を見出したい。交流のフィードバックならば、コンデンサなどで位相をずらせば、容易に共振現象を回避できるのであろう。本回路は交流のフィードバックではなく、直流のフィードバック回路となっている。かつ、アナログ回路でもある。もし、マイクロコンピュータを組み込んだデジタル回路も組み入れれば、位相対策は容易であろう。アナログ的な対策を思索中である。

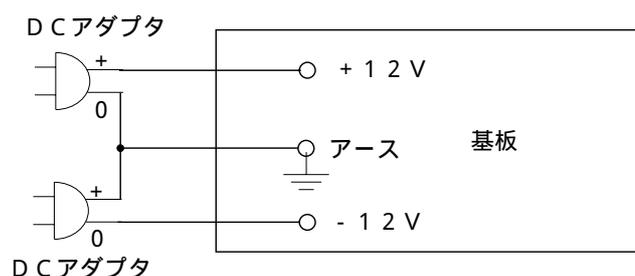


図8 - 12VもDCアダプタから供給

6. おわりに

本装置をもう少し改良したい。すぐにやるかどうかは別にして、以下の課題を考えている。

(1) 最大コイル電流を大きくできる回路とし、参考品と同じ程度の許容平衡位置範囲を実現できるか試してみたい。

(2) MAX635は値が張る。DCアダプタ2個では少し体裁が悪い。マイナス電源を使用しない回路の作成も考えてみたい。

(3) 本装置を基礎として、大きな磁気浮遊装置も考えたい。展示ができれば、インパクトが大きいのではなからうか。

参考文献

(1) 「メカトロ・センサ活用ハンドブック」 p38, CQ出版社。」

(2) 「トランジスタ技術 special No.32 特集実用電子回路設計マニュアル」 p46, CQ出版社。

2006年9月30日