

TAMA300用マグネット・コイル・アクチュエータの カップリング測定

新井 宏二
東京大学理学物理学科

平成 17 年 12 月 12 日

1 はじめに

TAMA300 で使用する鏡は振り子に吊られ、その位置は磁石とコイルを組み合わせたアクチュエータによって制御される。その際、コイルに電流を流すためのドライバー回路のノイズが、鏡を揺らし、重力波検出器の観測を妨げる可能性がある。そのため、マグネット・コイル・アクチュエータの電流-力カップリングの大きさが制限される。その大きさは、 0.125gw/A^1 ($=1.225 \times 10^{-3}\text{N/A}$) ないし、 0.25gw/A ($=2.45 \times 10^{-3}\text{N/A}$) であることが、河邊氏による計算で示されている。

私は、上記のカップリングを実現するための予備実験として、TAMA300 用コイルボビンに TAMA300 用コイル線材を巻き付けたコイルを製作し、既存の磁石とのカップリングを測定し、アクチュエータのカップリングのモデル化と上記のカップリングの調整を行ったので報告する。

本文書の構成は以下の通りである。

- 第 2 節ではマグネットとコイルのモデル化とカップリングの大きさの計算について述べる。
- 第 3 節ではマグネットとコイルの相対位置を変えながらカップリングを測定する実験について述べる。
- 第 4 節では計算と実験の結果について考察を述べる。

2 マグネットとコイルのカップリングの計算

まず、 z 軸を中心として反時計まわりに流れる円環電流 (半径 a , 電流の z 方向の線密度 j) が $z = z'$ にあると考える。この電流が z 軸上につくる磁束密度は z 軸方向を向いていて、大きさは

$$b_z = \frac{\mu_0 a^2 j}{2[a^2 + (z - z')^2]^{3/2}} \quad (1)$$

¹1gw = $10^{-3}\text{kg} \times 9.8\text{m/s}^2$

である。この円環電流が $z' = -L/2$ から $z' = L/2$ まで連なって、長さ L のコイルを形成しているとき、 z 軸上に発生する磁場は、

$$B(z) = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} b_z dz' = \frac{j\mu_0}{2} \left[\frac{z + \frac{L}{2}}{\sqrt{a^2 + (z + \frac{L}{2})^2}} - \frac{z - \frac{L}{2}}{\sqrt{a^2 + (z - \frac{L}{2})^2}} \right] \quad (2)$$

となる。

次にマグネットを磁荷 q_m と $-q_m$ が z 軸方向に距離 d だけ離れて位置するものとして、モデル化する。マグネットの中心が z 軸上の $z = z$ にあるとき、マグネットに働く力は、

$$F(z) = q_m B(z + \frac{d}{2}) - q_m B(z - \frac{d}{2}) \quad (3)$$

$$= \frac{jq_m\mu_0}{2} \frac{z + \frac{d}{2} + \frac{L}{2}}{\sqrt{a^2 + (z + \frac{d}{2} + \frac{L}{2})^2}} - \frac{jq_m\mu_0}{2} \frac{z + \frac{d}{2} - \frac{L}{2}}{\sqrt{a^2 + (z + \frac{d}{2} - \frac{L}{2})^2}} \\ + \frac{jq_m\mu_0}{2} \frac{z - \frac{d}{2} - \frac{L}{2}}{\sqrt{a^2 + (z - \frac{d}{2} - \frac{L}{2})^2}} - \frac{jq_m\mu_0}{2} \frac{z - \frac{d}{2} + \frac{L}{2}}{\sqrt{a^2 + (z - \frac{d}{2} + \frac{L}{2})^2}} \quad (4)$$

となる。 $\frac{jq_m\mu_0}{2}$ の因子はコイルやマグネットによって決まるので、ひとまとめにしてフィッティングのパラメータとしている。

3 実験結果

実際にコイル・マグネット・アクチュエータを製作して、カップリングを測定した。実験のセットアップは図1の通りである。コイルにDC電流を流し、マグネットにかかる力を電子天秤で測定した。DC電流はコイルと直列に入っている 10Ω の抵抗の両端の電圧から計測し、電流と力の比からカップリングが計算できる。そして、ZステージやXステージによりコイルとマグネットの相対位置を変化させながら、カップリングの測定を繰り返した。電子天秤の最小秤量は 10mg でこれは今回の測定には十分小さいとはいえなかったため、コイルに正負逆方向に最大限電流を流したときの秤の読みの差を測定している²。流した電流はおよそ $\pm 180\text{mA}$ である。

今回使用した磁石はNd系のもので、懸架装置のダンピングマグネットに使用されているものと同タイプである。サイズは直径 2mm 、長さ 10mm である。コイル・ボbinは図2に示した寸法のもので、これにTAMA300で使用する住友電工のセラミック電線を丁寧に巻き付けたところ、きっちり1層巻くのに37回巻く必要があった。測定では、この37回巻きと8回巻き、6回巻き、3回巻きを使用した。巻数が一層分に満たない場合はボbinの先端側に線がゆるみなく巻き付いているようにした。

コイル・ボbinの中心軸上にマグネットを置いたときの、測定結果を図4に示した。横軸はコイルの中心と磁石の中心の z 軸上での距離であるが、一部目測に頼った³部分があるので、精度はそれほどない。

²より正確に言うと、どちらかの方向に電流を流しているときの秤量を0に設定して計測した。

³コイル・ボbinにマグネットが入っていくときのマイクロメータの読みを使用した。 1mm も見違える訳はないので、精度は悪く見積もって 0.5mm くらいかと思われる。

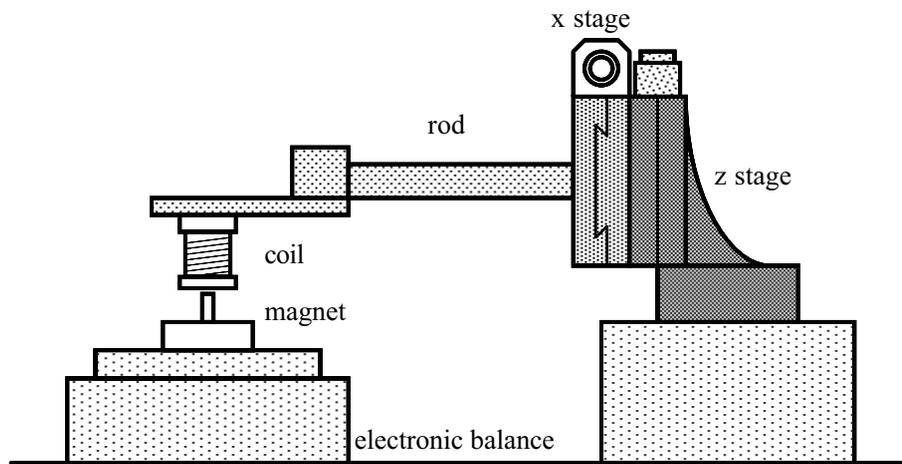


図 1: 実験のセットアップ

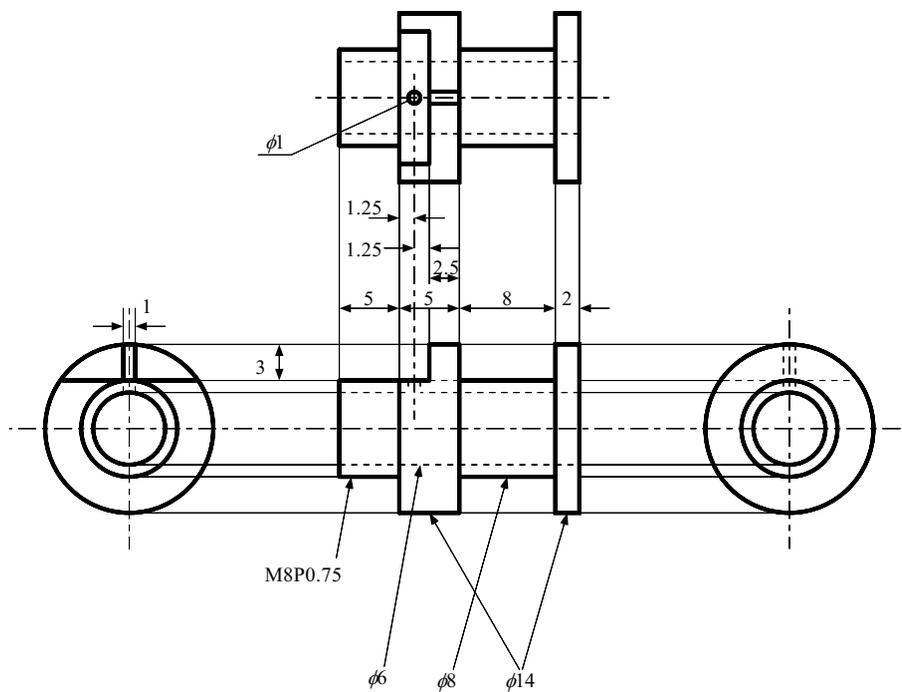


図 2: コイル・ボビンの仕様

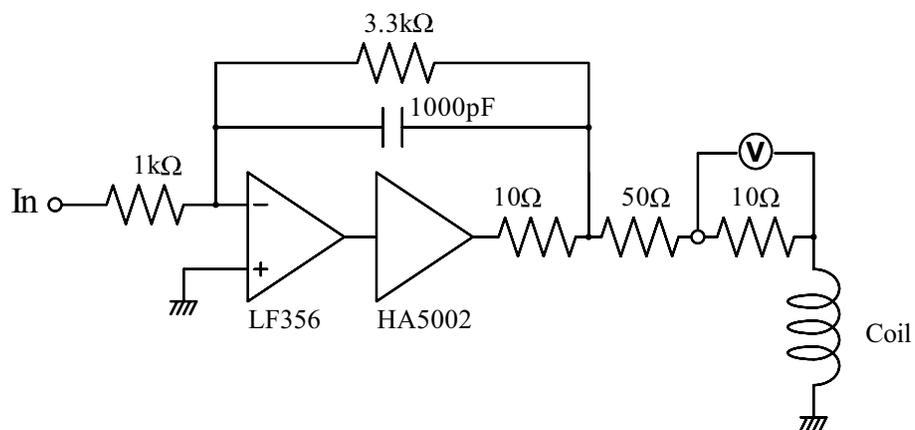


図 3: コイルドライバーおよび電流検出部の回路図

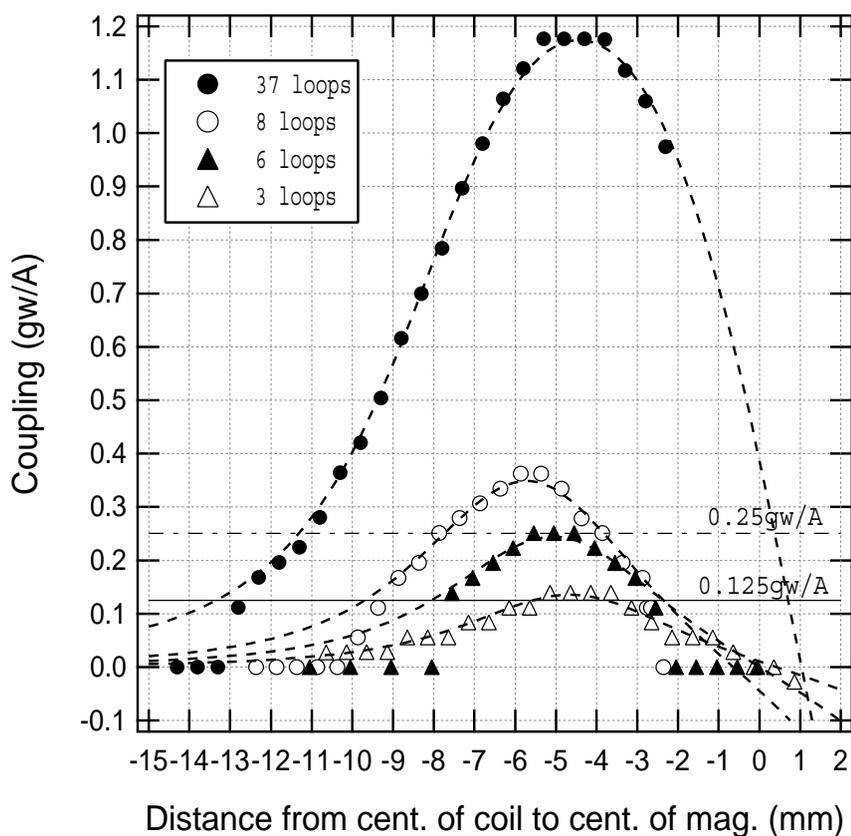


図 4: カップリング測定の結果。横軸はコイルの中心と磁石の中心の距離を表しているが、これはおおよその値である。

各巻き数での最もカップリングが強くなったとき（つまり、特性が平坦になる点）の値は次表の通りである。目標の 0.25gw/A に対しては 6 回巻きが、0.125gw/A に対しては 3 回巻きが対応するが、3 回巻きに関してはカップリングが目標より 10%ほど大きくなった。

コイルの巻き数	カップリング (gw/A)
37	1.177
8	0.362
6	0.251
3	0.139

測定の結果を (4) 式に従って、

$$\alpha \left[\frac{z - z_0 + \frac{d}{2} + \frac{L}{2}}{\sqrt{a^2 + (z - z_0 + \frac{d}{2} + \frac{L}{2})^2}} - \frac{z - z_0 + \frac{d}{2} - \frac{L}{2}}{\sqrt{a^2 + (z - z_0 + \frac{d}{2} - \frac{L}{2})^2}} + \frac{z - z_0 - \frac{d}{2} - \frac{L}{2}}{\sqrt{a^2 + (z - z_0 - \frac{d}{2} - \frac{L}{2})^2}} - \frac{z - z_0 - \frac{d}{2} + \frac{L}{2}}{\sqrt{a^2 + (z - z_0 - \frac{d}{2} + \frac{L}{2})^2}} \right] \quad (5)$$

によりフィッティングを行った。N をコイルの巻き数として、

$$a = 4\text{mm} \quad (6)$$

$$d = 10\text{mm} \quad (7)$$

$$L = 8\text{mm} \frac{N}{37} \quad (8)$$

を仮定した。フィッティングによって決めるパラメータは α, z_0 である。フィッティングの結果は次表の通りで、図 4 の点線としても結果を示している。この結果のように、 α は巻き数によって大きく変わることがなく、今回使用した系では 0.8 ~ 0.9gw/A であることがわかった。

コイルの巻き数	α (gw/A)	z_0 (mm)
37	0.908	1.036
8	0.874	-0.672
6	0.805	0.005
3	0.882	0.882

3.1 軸をずらしたときのカップリングの変化

磁石がボビンの中心軸からはずれたときに、カップリングがどう変化するかを調べた。この測定ではカップリングの変化量が小さかったため、37 回巻きのコイルのみ使用した。磁石とコイルの中心軸をあわせ、最もカップリングが大きくなるように配置してから、X ステージを動かしてカップリングを測定した (図 5)。カップリングの変動についてまとめると次の通りである。

- 中心付近では 1.177gw/A のカップリングであった。
- 軸を $\pm 0.5\text{mm}$ ずらしても変化は現れなかった。変化量の上限としては 2.4% であることになる。

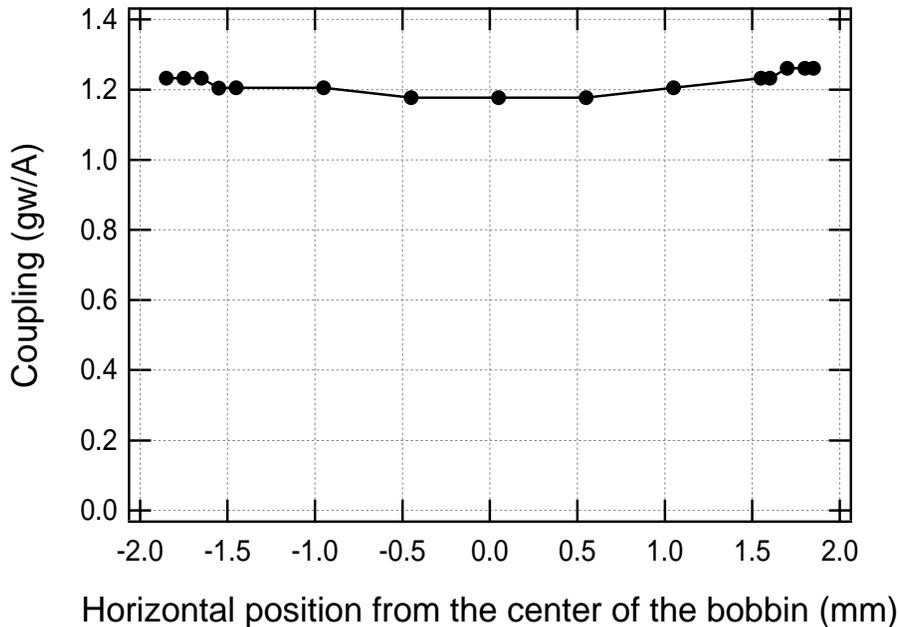


図 5: 軸をずらしたときのカップリングの変動。コイルは 37 巻きのものである。横軸はコイル軸と磁石の軸の距離を表している。

- 軸を $\pm 1\text{mm}$ ずらしたところ、カップリングが 2.4% 増加した。重量測定の精度を考えると増加量の上限は 4.8% であるといえる。
- 軸をコイル・ボビンの内壁すれすれまで近づけていくと、最大 7.2% 増加した。

コイルを軸からずらしたときの変動には、ボビン内での磁場の分布に加え、ボビンの外での磁束の広がり方が関係してくるので、カップリングの変動率はコイルの長さに依存すると思われるが、詳しい計算による解析は行っていない。

4 考察

基本的にコイルと磁石のカップリングは計算で予測可能であることがわかった。また、その計算に従いコイルの巻き数を調整した結果、カップリングの大きさを 0.125 gw/A, 0.25gw/A に近づけることができた。ただし、巻き数が少ないため、カップリングの微調ができず、0.125gw/A に対しては 10% ほどずれを生じた。このことから、使用する磁石を弱いものまたは小さい(短い)ものにして、巻き数を増やすことが考えられる。巻き数を増やすと単にコイルを巡る電流の総量を微調できるのみならず、コイルが長くなることで巻き数の調整に対するカップリングの増減が鈍くなる効果も見込める。

数巻き程度のコイルにしてはコイルボビンの鏝(つば)も大きすぎるということがわかった。そこで、弱い磁石を使用し、コイルは 1 層巻き程度にするとよいだろう。コイルボビンは径はそのままで鏝をもっと小さくすることができるので、ボビンによるレーザー光の損失もより少なくできるだろう。

今後は TAMA 指定の磁石を選定してもらい、目標のカップリングを実現するための巻き数を決定する予定である。

5 余談

当初、磁石をアルミの円柱に固定して、それを電子天秤(メトラー)にのせていたが、力が 0.04gw より弱くなると 0.00gw を指してしまうという特性があった。3 回巻きの測定の際に、さらに 60g 程度のおもりを加えたところ、0.01gw まで測定できるようになった。メトラーは多少荷重をかけた方が細かくまで測れるようである。