

## 26 永久磁石による水の反磁性の観測

### 1 研究の動機

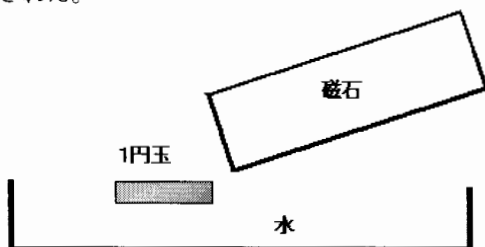
インターネットで見つけたホームページで超伝導コイルの中に置かれた水が磁界によって割れる写真を目にした。この現象は東京大学の北澤教授らによって「モーゼ効果」と名づけられている。モーゼは旧約聖書に登場するユダヤ教の預言者で、旧約聖書によれば、「モーゼが率いるユダヤの民は分断された海水の中から現れた海底を歩いて紅海を渡り切り・・・」とある。つまりこの現象は磁界によって水面が「割れる」ことから、海が割れて露出した海底を歩いてエジプトから脱出したモーゼの話にたとえられているわけである。

モーゼの話が実話であるかどうかはともかくとして、磁界によって水が割れるなどということが起こるとは考えもしなかった。驚きである。

今回研究として簡単に手に入る永久磁石でこの現象を確認して、水面の変化を観察できないかと考え、取り組んでみることにした。

### 2 モーゼ効果の原理と研究のポイント

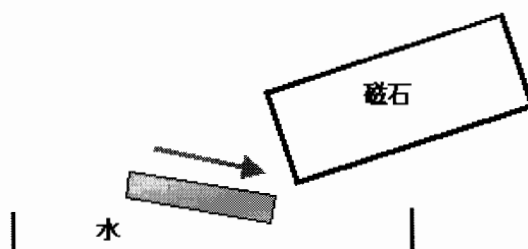
水は一般的には反磁性の性質をもっている。つまり水は磁場に反発する性質を持っていると言うことである。しかしその反発する力は非常に弱いため、通常の磁石ではその反発力を感じたりすることはほとんどない。水が反磁性をもつ簡単な実験として下図のような実験が以前テレビ番組で紹介された。



水に浮かべたアルミ製の1円玉(表面張力で浮かんでいる)に強力な磁石を近づける。すると1円玉が磁石に近づいてくる。1円玉は磁性体でない(=磁石につかない)ので通常は磁石にひきつけら

れることはない。ではなぜ近づくのか? この現象は次のように説明される。

- (1) 磁石を1円玉に近づけることで、1円玉の磁石に近いほうの水が反磁性によって反発し表面から押しつけられ、くぼみができる。
- (2) このくぼみに向かって1円玉がすべり落ちるため、磁石に近づいてくるように見える。



実際にやってみるとくぼみはその高低差が非常に小さいようで、肉眼でくぼみを確認することは難しく、1円玉の動きも緩やかである。

結局、モーゼ効果は磁界に置かれた水が自分の反磁性によって発生する力に変形して、くぼみができる現象といえる。ただし、この実験でわかったようにその効果はかなり微小であると思われる。

モーゼ効果を起こすには水のような反磁性体と強い磁場が必要であることがわかったが、その磁場の強さを考えてみる。

HPの場合、磁束密度は10Tと書いてあるが、これはかなり高い磁束密度で普通の磁石では実現できない。磁石の種類と磁束密度を下表に示す。

種類	磁束密度
地球	0.0005T
ネオジム磁石(永久磁石)	0.5T
HPの超伝導磁石	10T
世界最高性能の超伝導磁石	30T~40T

主な磁石と磁束密度

今回の実験では永久磁石を用いるので、磁束密度は最大0.5T程度となる。モーゼ効果を肉眼で確認するためには強力な磁束密度をもつ磁場が必要であることがわかる。

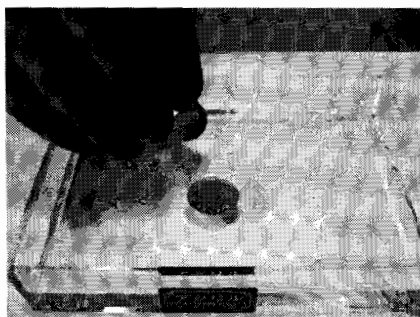
以上のことから今回の研究のポイントは次の3点である。

- (1) モーゼ効果が実際に起こっているかを確認すること。
- (2) 起こっているのであれば微小な水面の変化を測定する方法を考えること。
- (3) 水面の変化を直接測定できないことが予想される。この場合には別の測定方法で観測して、得られたデータから水面の変化を計算する方法を考えること。

### 3 モーゼ効果の確認

- (1) モーゼ効果は本当に起こるのか？

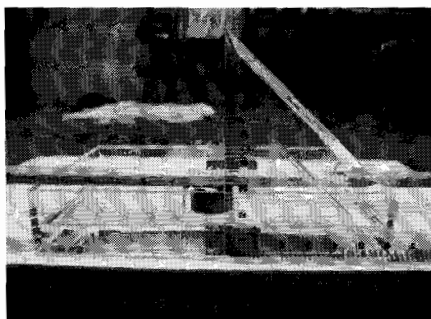
【実験】 プラスチックのさらに水を入れて1円玉を浮かべる。ネオジム磁石を近づけて1円玉が動くかどうかを確認する。



【結果】 磁石を近づけると1円玉が動くことを確認。磁石を1円玉から遠ざけると動きが止まるので、水面になにかの変化が起きていることは確認できた。

- (2) 水面の変化を確認できるか？

【方法】 透明なプラスチックに水を入れ、上から永久磁石を近づける。水面を横方向から観察し、磁石を近づけた場合の水面の変化を調べる。スケールで水面の変化量がわかれば、水面の形状を調べることができる。



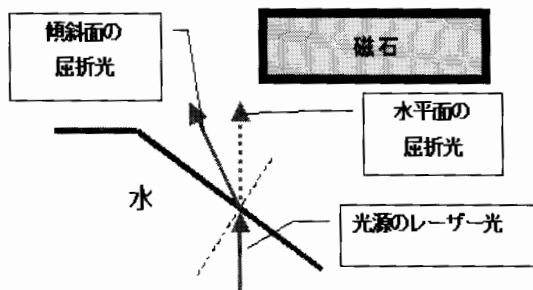
【結果】 磁石を水面に接近させてスケールで水面変化を測定しようとした。磁束密度は磁石からの距離の4乗に比例して弱くなるため、実際の測定時には磁石は図の写真よりギリギリまで水面に近づけている。しかし磁石を近づけても全く変化せず、測定不可能であった。変化はあるのかもしれないが、最初の予想のように、その大きさは肉眼で測定できないほど小さいと思われる。

### 4 測定装置の考案

肉眼での測定はあきらめて、別の方法で測定することを考えた。

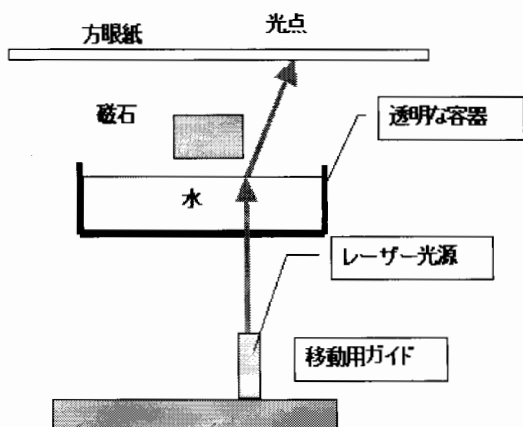
- (1) 測定原理

磁石に近い部分の水面は表面が水平からくぼんでいると思われる。(凹レンズに近いような形?)したがって、水面に平行に進んだ光は水と空気の境界で外側に曲がるはず。磁石があるときとないときで光源と光点の関係を調べれば水面のくぼみ具合を求めることができる。



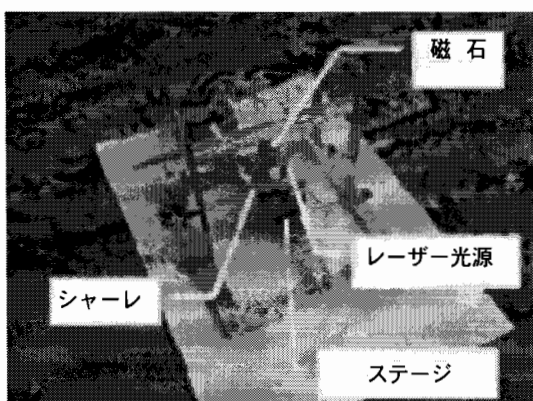
- (2) 具体的な測定方法

- ア 底が透明な容器に水を入れる。
  - イ 水面近くに磁石を設置する。
  - ウ 水面の下から容器の底越しにレーザー光をあてて、その光点をグラフ用紙に映す。
  - エ レーザー光源を水平に移動し徐々に磁石に近づける。
  - オ レーザー光源と光点の位置の変化を記録する。
  - カ 光源と光点の位置の差からその位置での水面の傾きを計算する。
- 具体的な測定装置を次ページに示す。



## 5 実際の実験装置と実験

考案した実験装置を組み立てて実験を行った。次ページに移動用ガイド、磁石、レーザー光源をセットした実験用スタンドの写真を示す。



### (1) 実験の準備

- ア シャーレに水をいれて、スタンドにセットする。
- イ 水面ぎりぎりに磁石をセットする。このとき水面と磁石の距離が大きいとモーゼ効果がわかりにくくなるので、できるだけ水面と磁石を接近させる。最終的にはスポイトで水の量を加減して、水面の高さを微調整する。
- ウ 光源を端のストッパに当たるまで移動させる。そのときの光点をグラフ用紙に記録する。

### (2) 実験

- ア スケールを使用して1~0.5mmずつ、レーザー光源を磁石に近づけゆく。移動距離の測定にはノギスを使用して、1mm以下の移動量も正確に測定する。
- イ 光源を移動させたとき、グラフ上の光点の移動量をグラフ用紙で読み取る。
- ウ 光源と光点の移動量を記録する。
- エ 光が磁石に遮られて光点が消えるまで上記のア~ウを繰り返す。

### (3) 実験データの処理方法

実験で得られるのは水面の傾斜による光点の移動量であるから、これを使って水面の傾斜の様子を計算する必要がある。水面の一部を考えて、その部分での水面の傾き $\theta_1$ は一定とする。

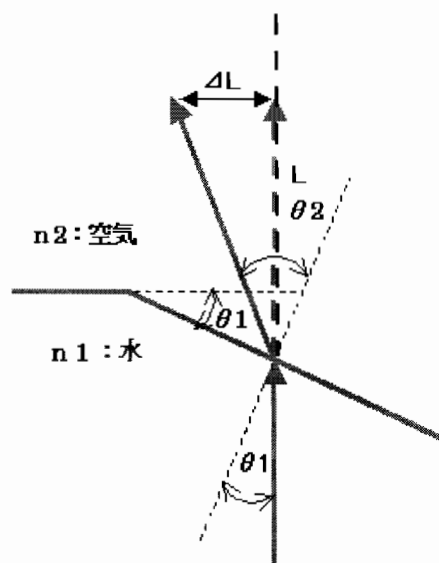
$n_1$ :水の屈折率,  $n_2$ :空気の屈折率,  $\theta_1$ :水面と水平のなす角,  $\theta_2$ :水面での屈折角,  $L$ は水面から測定する光点までの距離とする。 $\Delta L$ は屈折によって光点が移動する距離。

$L$ と $\Delta L$ は測定可能、 $n_1, n_2$ については定数とすると下図において以下の式が成り立つ。

$$\sin \theta_1 = n_2/n_1 \times \sin \theta_2 \quad \text{スネルの法則}$$

$$\Delta L = L \times \tan(\theta_2 - \theta_1) \quad \text{三角関数の定義}$$

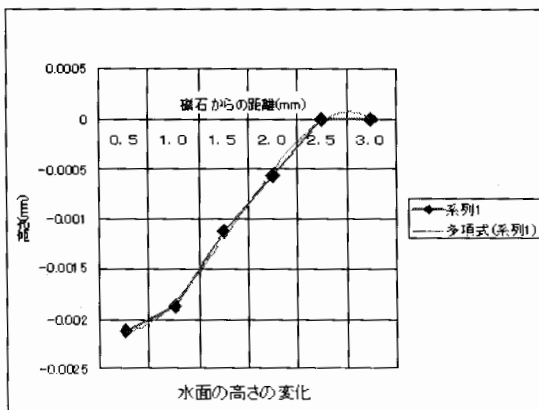
$L, \Delta L, n_1, n_2$ がわかっているのだから、 $\theta_1$ を求める。 $\theta_1$ がこの水面の水平からの傾斜角度になるので、これから、水面の高さ計算し、つなげれば水面の形が求まる。



これらの式は $\theta_1, \theta_2$ を解とする三角関数を含んだ連立方程式である。

三角関数を含んだ方程式は式自体が特別な形をしていれば解くことができるが、そうでない場合にはいろいろなやり方で式を変形してうまく公式を当てはめる必要がある。

方程式を解くことがこの研究の直接の目的ではないので、ここではコンピュータによる数式解析ソフトウェアMathematicaを使って計算することにした。



グラフ 2 水面の変化

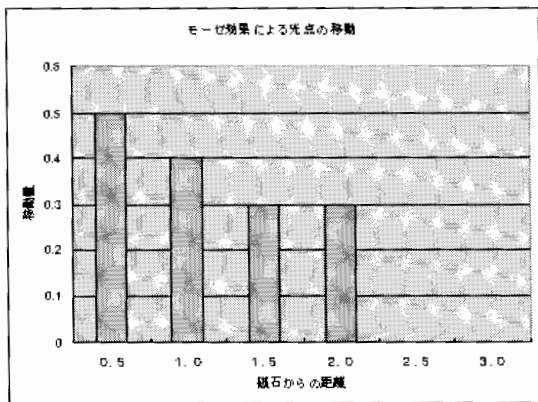
## 6 実験結果のまとめ

### (1) 光点の移動量

測定した光点の位置をグラフ 1 に示す。12 mm 以上は光点が磁石に遮られて測定不能である。モーゼ効果は移動量 9.5 mm 前後 (磁石との距離が 2 mm くらい) から観測されることがわかる。

### (2) 移動量から計算した水面の形状

1 で測定した、光点に移動量をもとに計算した水面の形状をグラフ 2 に示す。赤い線は実測データを直線で結んだもの、青い線はエクセルで求めた近似式で滑らかにつないだものである。レンズ型になっていることがわかる。ただし、磁石の内側は屈折光が磁石に当たって測定できないため、このデータは磁石周辺の水面の傾斜を示している。水面形状の測定はかなり困難であったが、ほぼ予想した結果となった。



グラフ 1 位置の変化

## 7 理論値と比較

最初に紹介した HP にモーゼ効果で変形する水面の高さの計算式が示されている。

界面高低差は

$$\Delta h = ((\chi_A - \chi_B) \mu_0) / [2(\rho_A - \rho_B) g] B^2$$

$\chi_A, \chi_B$  はそれぞれの液体の磁化率、 $\rho_A, \rho_B$  は密度であり、 $\mu_0$  は真空の透磁率、 $g$  は重力加速度、 $B$  は磁束密度である。

今回の測定値の大きさとしては理論値に比べてかなり小さい観測結果になっている。中心部ではさらに大きな水面の変化が起こっている可能性は十分あるが、残念ながら今回の測定方法ではそれを確認することはできない。

## 8 結果のまとめと感想

- (1) 永久磁石と普通の水を使用してモーゼ効果を観測する方法を考案し、実際に観測することができた。
- (2) 測定したデータでコンピュータで水面の形状を計算することができた。形状は予想や理論に合うものと考えられる。
- (3) 測定装置の制約から理論値と同じ結果を得ることまでの検証ができなかった。得られたデータが正しいかどうかの検討は今後の課題である。