

# 電流動球現象～現象の確認と原理の解明～

静岡県立浜松北高等学校

自然科学部物理化学班 2年 森下雄二郎 他5名

## 1 はじめに

電流の流れる円形の金属レールの上で金属球が走り続ける現象(明確な現象名が無いので、便宜上これを 電流動球現象と呼ぶ)が、19世紀にジョージ・ゴア氏によって確認された。(参考文献(\*1) 参照) ゴア氏はこの原理を「電流を流した時のジュール熱によるレールや中実鉄球が熱膨張し、中実鉄球が不安定になることが繰り返されて起きる」としている。しかし電流動球現象に関して定量的に分析した研究データは見当たらない。そこで、「電流動球現象の確認及び原理の解明」を目的とした研究を行うことにする。

## 2 電流動球現象の確認

### 2.1 実験1：電流動球現象の確認

#### 2.1.1 概要・仮説

もし、電流動球現象が存在するならば電流を流した時の方が電流を流さない時よりも速く中実鉄球が転がり、電流を流した場合では加速することが起こりうると考えられる。そこで、金属のレールに中実鉄球を走らせ、電流を流した時と流さない時での速度の推移の違いを調べ、電流動球現象の存在を確認する。

#### 2.1.2 実験方法

① 直線の鉄道模型用のレール(トミックス社製ストレートレール S140(F)・金属部分の材質は洋白・軌間 9mm・全長 135cm※以下の実験においても同様)の上にスタートの位置(これをスタートからの距離 0m と定義する)を 1 個目にして 0.15m 間隔でビースピを 10 個設置する。(図 1 参照) また、レールの一端に傾斜付きのレールと定電流電源装置を繋げる。

斜面上で中実鉄球(UnDigital 製鋼鉄球直径 3cm・質量 111g ※以下の実験(補足実験 1 を除く)においても同様)を、スタートの位置を通過した時の速度が 0.45m/s となるように走らせる。

② 電流を流さない場合は、設置したすべてのビースピで速度の値を読み取る。これを 10 回繰り返す。

電流を流す場合は、ジュール熱による中実鉄球の初期条件変化(中実鉄球を走らせる前の温度の変化)を考慮して、直流電流 6A を流した状態で予め 5 回走らせる。中実鉄球が 1 つ目のビースピを通過した時点で、直流電流 6A をレールに流す。(この時、通過判定には「光センサ」や「Raspberry Pi Pico」を応用して自作したセンサを用いた。(図 2 参照) その後、設置した全てのビースピで速度の値を読み取る。これ 10 回繰り返す。



図 1：ビースピを設置した時の様子



図 2：センサ・斜面・定電流電源装置の様子

③ 電流を流す場合と流さない場合での各地点(スタートからの距離)における速度の推移を比較する。

#### 2.1.3 実験結果と考察

① 実験結果を図 3 に示す。

電流を流した場合に加速することはなかったが全体的に電流を流した時の方が電流を流さない時よりも速く中実鉄球が転がった。特に 1.35m 地点では平均で 0.025m/s 速度が上昇した。この上昇は実験全体での速度の変域が 0.33m/s～0.45m/s に対してのものであるから実験の精度によるものとは言えない。したがって電流

動球現象の存在を確認できたと考えられる。

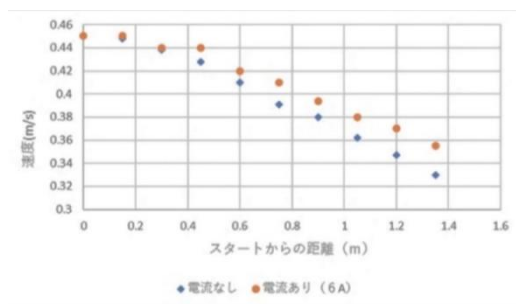


図3；実験1の結果を平均で比較

### 3 電流動球現象の原理の解明

始めに、原理の仮説として考えられるものを挙げるためには実験事実が不足していることから、電流動球現象の「電流値依存性」と「速度依存性」の有無を調べる。

#### 3.1 実験2：電流動球現象の「電流値依存性」の検証

金属のレールに中実鉄球を走らせ、実験1と同様の方法で、電流を3A・6A・9Aの3段階に分けて流した時のそれぞれの速度の推移の違いを基に、電流動球現象の「電流値依存性」の有無を調べる。

図に結果を示す。「各電流値において、『各地点での速度の合計/10』によって導かれる平均速度と電流なし(0A)の時 の平均速度との差:  $\Delta v_1$ 」と「電流値: I」との関係を図5に示す。

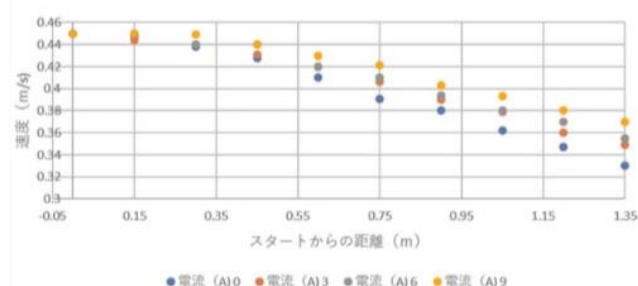


図4：実験2の結果を平均で比較

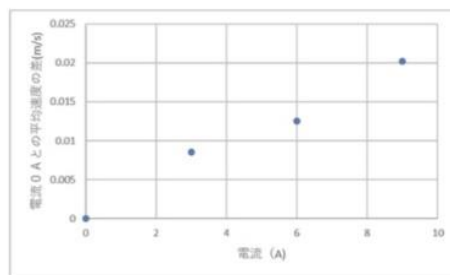


図5「 $\Delta v_1$ 」と「I」との関係

より大きな電流を流した時の方が、特に1.35m地点付近における速度が大きくなった。図5より、「Iが増加すれば $\Delta v_1$ は減少する・・・法則1」が成立すると考えられる。すなわち、電流動球現象には「電流値依存性」がある。

#### 3.2 実験3：電流動球現象の「速度依存性」の検証

金属のレールに中実鉄球を走らせ、スタートの位置の速度を0.30m/s・0.45m/s・0.60m/sの3段階に分け、それぞれにおいて電流を9A流した時と電流を流さない時の速度の推移を調べる。また、スタートの位置の速度を変えた時の電流の有無による各地点での速度の差を基に、電流動球現象の「速度依存性」の有無を調べる。図に結果を示す。スタートの位置の速度を変えた時の、電流の有無による各地点での速度の差を図7に示す。

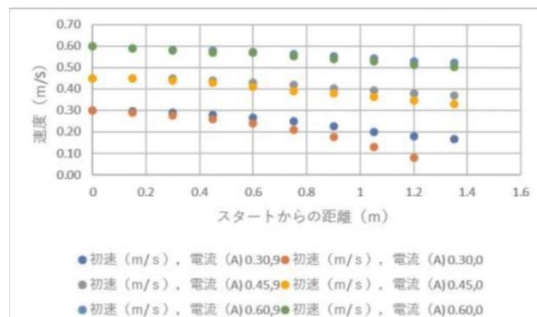


図6：実験3の結果を平均で比較

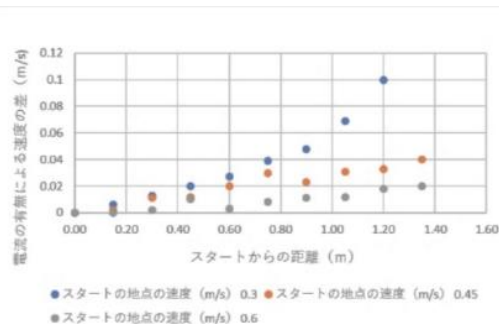


図7：電流の有無による各地点での速度の差

スタートの位置の速度がより小さい時の方が、特に1.35m地点付近における電流の有無による速度の差が大きくなった。この実験で得られる結果は、スタートの位置における速度をある値に固定して、十分に長い金

属のレールの上を走らせた時の電流の有無による各地点での速度の違いを調べたものに近い。そこで「電流を流さない時の速度： $v_2$ 」と「電流の有無による速度の差： $\Delta v_2$ 」の関係を図8に示す。

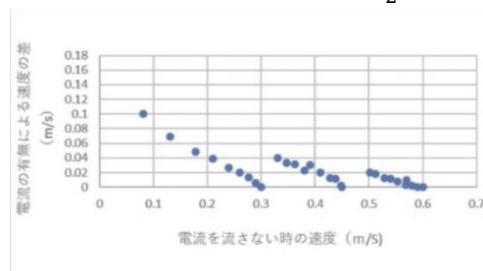


図8：「 $v_2$ 」と「 $\Delta v_2$ 」の関係

図8より、「 $v_2$ が増加すれば $\Delta v_2$ は減少する」・・・法則2 が成り立つと言える。

これらのことを踏まえれば、電流動球現象は中実鉄球の速さが小さいほど顕著に見られる（「速度依存性」がある）ということが言える。

### 3.3 仮説の列挙

実験1～3で分かったことをもとに電流動球現象の原理として考えられる仮説として、「仮説1：電流を流した時のジュール熱によるレールや中実鉄球が熱膨張し、中実鉄球が不安定になることが繰り返されて起きる現象 ※この仮説はゴア氏のものであるが、中実鉄球のある部分と金属レールのある部分が接触する僅かな時間で流れる電流による熱膨張が、電流動球現象を引き起こすものと言い切れるかどうかを検討する必要がある。」、「仮説2：電流を流したことで中実鉄球周辺に磁場が生じ、その磁場と電流によって中実鉄球が電磁力を受けて起きる現象」、「仮説3：中実鉄球が走行するときの摩擦力が、電流を流すことに伴うなんらかの条件の変化で減少し起きる現象」が考えられる。以下では3つの仮説のうち最も妥当で、「原理の主要因」と言えるものは何かを考察する。

### 3.4 実験4：仮説1（熱膨張による影響）の検証

#### 3.4.1 概要・仮説

サーモグラフィーカメラを用いて電流を流した時の中実鉄球と金属レールの温度変化を調べ、温度変化に伴う熱膨張をモデル化し、電流動球現象をもたらすかどうかを考察する。

今回は、\*1の記述を力学的に、「走っている金属球と金属レールの熱膨張により、金属球と金属レールが変形。上下方向の変形により、金属球の位置エネルギーが増加する。この位置エネルギーの増分は運動エネルギーの増加に用いられる。これが繰り返された結果、電流動球現象が起きる。（図9参照）」と解釈した。

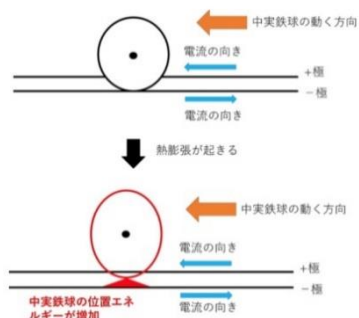


図9：解釈の説明

この解釈に基づいて実験を行う場合、もし仮説1が主要因ならば、「（あるビースピの通過時で中実鉄球がもつ運動エネルギー）－（中実鉄球がビースピ間を走行する時に、摩擦やレールのつなぎ目などで失われるエネルギー）＋（熱膨張によって得られる位置エネルギーの増分）＝（次のビースピの通過時で中実鉄球がもつ運動エネルギー）」という関係式が成り立つと考えられる。

なお、モデル化にあたって「中実鉄球の回転の運動エネルギーを求めるには、何らかの形に近似して慣性モーメントを求める必要があるが、処理の都合上熱膨張で変形が起こったとしても「球」に近似することにする」

「本来熱膨張は3次元的に起きるはずだが、考える熱膨張は中実鉄球の進行方向に対して、上下方向に限定す

る」「平面上において、金属球の走行方向に対して垂直向きの金属レールの温度変化を測定する」「中実鉄球と金属レールが接している箇所は上下方向に長い棒があるとみなし、この部分の熱膨張を考える。」「熱膨張は電流を流している間は連続して起こるものとする。(今回は、熱膨張の影響を位置エネルギーの変化として考えるため、この設定であっても差し支えない。)」

3.4.2 実験方法

- ① 直線の鉄道模型用のレール(軌間 9mm・全長 15cm)の上に、中実鉄球(直径 3cm・質量 111 g)を温まりにくい棒を用いて静止させ、レールの一端に定電流電源装置を繋げる。
- ② 図 10 のように、日本アビオニクス (株) の赤外線サーモグラフィ装置「InfReCThermo Shot F30 シリーズ」を設置し、撮影設定をグレースケールに設定する。中実鉄球に、直流電流 9A をレールに流す。流し始めて 20 秒から 10 秒ごとに流し始めて 60 秒になる までサーモグラフィカメラで図 11 のように金属球と金属レールを撮影する。



図 10 サーモグラフィカメラを設置した時の様子

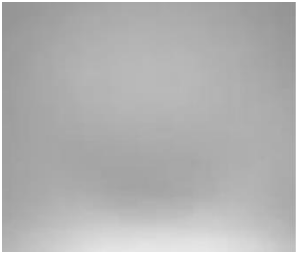


図 11 撮影した中実鉄球と金属レール

- ④ ③で撮影した写真すべてを「縦 145×横 134 (1 セルは、実際には上下方向に 0.217mm の大きさを持つ)」に分け、Python と Excel を用いてそれぞれの部分の温度 (T: 単位は℃) を調べ、Excel に出力する。Python で処理をするにあたり、標準ライブラリに加えて 22 個の外部ライブラリ (既製の関数がまとめられたもの) を使用した。特に主軸となったのは下記の 4 つである。また、処理する過程ごとに上記を用いた自作プログラムを 3 つ製作した。

表 1: 主軸となったライブラリの一覧

| Python 3.10   |          |                                                           |
|---------------|----------|-----------------------------------------------------------|
| ライブラリ名        | バージョン    | 用途                                                        |
| OpenCV-Python | 4.7.0.68 | 画像や動画の処理に関する機能。画像の読み取り、数値化する過程で使用。                        |
| OpenPyXL      | 3.0.10   | Python で Excel ファイルを扱うための機能。分析する Excel ファイルの読み取り／書き込みに使用。 |
| NumPy         | 1.24.1   | Python で多次元配列を扱いやすくする機能。画像を数値化する過程、変位量を計算する過程で使用。         |
| Matplotlib    | 3.6.2    | グラフ描画を扱う機能。                                               |

表 2: 自作プログラムの一覧

| プログラム名             | 用途                                                  |
|--------------------|-----------------------------------------------------|
| convert-thermoshot | サーモグラフィ画像を Excel ブック形式に変換し、画素と対応するセルにその温度を出力する。     |
| compare-sheets     | Excel ブック内の任意の 2 枚のワークシートの値を比較し、その差を別のシートに出力する。     |
| complement-sheets  | Excel ブック内の時間により区切られた任意の 2 枚のワークシートの値を比較し、その間を補完する。 |

「プログラム: convert-thermoshot」を用いて撮影した画像 (320x240) を画素単位で読み取り、1 画素 = 1 セルに対応させて値を Excel に出力する。(図 12 参照) 出力される値はグレースケール画像を HSV 色空間で読み取ったときの “V” = Value (輝度) で 0-255 の 256 段階である。この値とサーモグラフィ装置の 設定温度によりセルと対応する画素の温度が分かる。計算式は設定温度の最小値を $T_{min}$ 、最大値を $T_{max}$ 、輝度を $V$ としたとき式(1)のように表すことができる。

任意のセル (画素) の温度 $T = T_{min} + \frac{V}{255} \cdot (T_{max} - T_{min})$  (1)

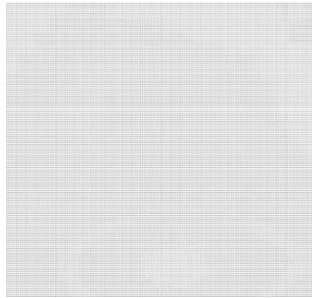


図 12: Excel に出力されたそれぞれの部分の温度

ここでExcel の (列, 行) を (x, y) と対応させる。(※x, y は整数であり、A 列から順番に x = 1、2、3、…、1 行から順番に y = 1、2、3、…とした。) 出力されたシートにおいて、中実鉄球と金属レールが接している箇所の x 座標は「x=67」である。中実鉄球は「 $1 \leq y \leq 138$ 」の領域に含まれ、金属レールは「 $139 \leq y \leq 145$ 」の領域に含まれる。

⑤ 実験 2 において、スタート地点を地点 1 とし、0.15m ずつ地点 2、地点 3…地点 n とする。この時地点 n から地点 n+1 まで中実鉄球が移動する時の時間( $t_n$ )は、地点 n—n+1 間では 2 地点間での平均の速さで運動をしているとみなすと、式(2)で求められる。

$$t_n = \frac{2 \cdot 0.15}{v_n + v_{n+1}} \quad (2)$$

⑥ ④の 4 つのシートをもとに「プログラム：complement-sheets」を用いて、「x=67 かつ  $1 \leq y \leq 145$ 」で表されるすべてのセルにおいて、 $1 \leq n \leq 9$  の範囲で、電流を流した時間( $t_n$ )に伴う温度変化( $\Delta T_y$ )を求め、エクセルで表として出力する。

⑦ 1 セルあたり上下方向に 0.217mm の大きさを持つから、地点 n—n+1 間で中実鉄球が熱膨張する時の列の大きさの変化量 ( $\Delta L_n$ :単位m) は、中実鉄球 (鋼鉄) の線膨張係数 ( $1.2 \times 10^{-5}$  (°C)) を用いると式(3)で求められる。

$$\Delta L_n = \sum_{y=1}^{138} (0.217 \cdot 10^{-3}) \cdot (1.2 \cdot 10^{-5}) \cdot \Delta T_y \quad (3)$$

また、地点 n—n+1 間で金属レールが熱膨張する時の列の大きさの変化量 ( $\Delta L'_n$ :単位m) は、金属レール (洋白) の線膨張係数 ( $1.6 \times 10^{-5}$  (°C)) を用いると式(4)で求められる。

$$\Delta L'_n = \sum_{y=139}^{145} (0.217 \cdot 10^{-3}) \cdot (1.6 \cdot 10^{-5}) \cdot \Delta T_y \quad (4)$$

⑧ 実験 1 の電流なしの場合について、地点 n における中実鉄球 (質量: ( $111 \times 10^{-3}$  (kg))) の並進運動と回転運動のエネルギーの和 ( $E_n$ :単位 J) は速さ  $v_n$  (単位は m/s) を用いて、式(5)で表される。

$$E_n = \frac{7}{10} \cdot (111 \cdot 10^{-3}) \cdot v_n^2 = 0.078 v_n^2 \quad (5)$$

地点 n—n+1 間 (距離 0.15m) で、中実鉄球の「摩擦やレールのつなぎ目などで失われるエネルギー ( $W_n$ : 単位 J) ※地点に依存」は、「金属レールを位置エネルギーの基準点にした時の中実鉄球の力学的エネルギー」を考慮したエネルギー保存則の関係より、式(6)で求められる。

$$W_n = E_n - E_{n+1} \quad (6)$$

式(6)に基づけば、 $1 \leq n \leq 9$  において は表 3 の通り。

表 3:  $W_n$ : 単位 J

| 地点   | $W_n(J)$ |
|------|----------|
| 1—2  | 0.00014  |
| 2—3  | 0.000691 |
| 3—4  | 0.000675 |
| 4—5  | 0.001177 |
| 5—6  | 0.001187 |
| 6—7  | 0.000662 |
| 7—8  | 0.001042 |
| 8—9  | 0.00083  |
| 9—10 | 0.000898 |

⑨ 実験 2 の電流あり (9 A) の場合について、地点 n における実験により測定された速さを  $v_n$ 、重力加速度を  $9.8 (m/s^2)$  とする。「仮説 1 が主要因 であった時の理論上の地点 n+1 における速さ  $v'_{n+1}$ 」、「摩擦やレールのつなぎ目などで失われるエネルギー」や「熱膨張前の中実鉄球の重心の位置を基準点にした時の中実鉄球の位置エネルギー」、「並進運動と 回転運動のエネルギー」を考慮したエネルギー保存則の関係式は、式 (7)となる。 この関係式を用いて  $2 \leq n \leq 10$  の範囲で  $v'_{n+1}$  の最大値を求め、「地点 n における実験により測定さ

れた速さ $v'_n$ 」と比較する。（⑥の処理で、中実鉄球の熱膨張は金属レールと接する下部を中心に熱膨張することがわかっている。このことから、中実鉄球の重心は実際には熱膨張前よりも下にずれることが予測される。また、 $\Delta L_n$ や $\Delta L'_n$ は、上下方向への伸びなので基準点からの高さとして直接用いられないはずである。これらのことを考慮して、式(7)は不等式とした。）

### 3.4.3 実験結果と考察

① 各地点間の $\Delta L_n$ と $\Delta L'_n$ を表5に示す。（E-0Xとは $10^{-X}$ のことである）各地点の $v'_n$ と $v''_n$ の最大値を表6に示す。

表5：各地点間の $\Delta L_n$ と $\Delta L'_n$

|    |      | $\Delta L_n$ (m) | $\Delta L'_n$ (m) |
|----|------|------------------|-------------------|
| 地点 | 1—2  | 7.28271E-07      | 8.90256E-09       |
|    | 2—3  | 7.30458E-07      | 8.92929E-09       |
|    | 3—4  | 7.37019E-07      | 9.00949E-09       |
|    | 4—5  | 7.54515E-07      | 9.22337E-09       |
|    | 5—6  | 7.72011E-07      | 9.43724E-09       |
|    | 6—7  | 7.96068E-07      | 9.73132E-09       |
|    | 7—8  | 8.24499E-07      | 1.00789E-08       |
|    | 8—9  | 8.48556E-07      | 1.03729E-08       |
|    | 9—10 | 8.748E-07        | 1.06938E-08       |

表6：各地点の $v'_n$ と $v''_n$ の最大値

|    | $v'_n$ (実測値) | $v''_n$ の最大値 |
|----|--------------|--------------|
| 地点 | 1            | 0.45         |
|    | 2            | 0.45         |
|    | 3            | 0.449        |
|    | 4            | 0.44         |
|    | 5            | 0.43         |
|    | 6            | 0.421        |
|    | 7            | 0.403        |
|    | 8            | 0.393        |
|    | 9            | 0.38         |
|    | 10           | 0.37         |

表6によれば、 $2 \leq n \leq 10$ において「 $v'_n > v''_n$ の最大値」となっている。 $\Delta L_n$ と $\Delta L'_n$ も非常に小さい。式(7)を応用して、「 $v'_n = v''_n$ の最大値」となるための条件を求めると地点 $n - n + 1$ 間における温度変化( $\Delta T_y$ の和)が最低でも $100^\circ\text{C}$ になる必要がある。これらのことから、解釈や測定方法が正しくない可能性もあるが、仮説1は主要因とは言えないと考えられる。

続いて、仮説2の検証実験を行う。

### 3.5 実験5：仮説2（磁場による影響）の検証

#### 3.5.1 概要・仮説

物体の移動方向に対して電流が流れてくる方向を変えることで電流による磁場の向きを変え、中実鉄球が電磁力を受ける方向を変えた時の速度の推移を実験2と比較する。金属レールと中実鉄球でコイルができているとみなす時、右ねじの法則・フレミング左手の法則によれば、電流が流れてくる方向を変える前の電磁力の向きと電流が流れてくる方向を変えた時の電磁力の向きを図13、14に示す。

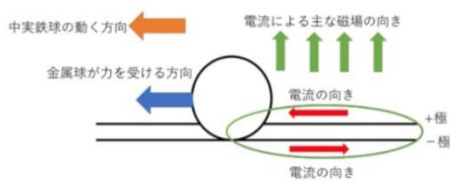


図13：電流の方向を変える前の電磁力の向き

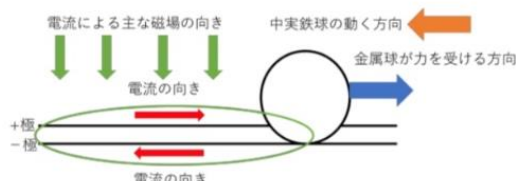


図14：電流の方向を変えた後の電磁力の向き

仮説2が正しい時、電流動球現象における電流の有無による速度差は電磁力により生じるものと言える。電磁力の向きが変わればそれまで「正の速度差」があったものが「負の速度差」を生じることになり、電磁力は電流の大きさに比例するから、「負の速度差」は流した電流値が大きければ大きいほど顕著に現れると考えられる。

#### 3.5.2 実験方法

- ① 直線の鉄道模型用のレール(軌間9mm・全長135cm)の上にスタートの位置（これをスタートからの距離0mと定義する）を1個目にして0.15m間隔でビースピを10個設置する。レールの一端に傾斜付きのレールを繋げたのち、傾斜付きのレールが無い端（実験1と異なるレールの一端）に定電流電源装置を設置し、斜面上で中実鉄球(直径3cm・質量111g)を、スタートの位置を通過した時の速度が0.45m/sとなるように走らせる。
- ③ ジュール熱による中実鉄球の初期条件変化（中実鉄球を走らせる前の温度の変化）を考慮して、実験で用いる直流電流を流した状態で予め5回走らせる。中実鉄球が1つ目のビースピを通過した時点で、直流電流を

3A・6A・9Aの3段階に分けてレールに流す。(この時、通過判定には自作したセンサを用いた。)その後、設置した全てのビースピで速さの値を読み取る。これをそれぞれ10回繰り返す。

④ 電流を流す場合と流さない場合での各地点(スタートからの距離)における速度の推移を比較する。

### 3.5.3 実験結果と考察

① 実験結果を図15に示す。(図15では比較用に実験1の電流なしの結果も記載した)また、「各電流値において、『各地点での速度の合計/10』によって導かれる平均速度と電流なし(0A)の時の平均速度との差:  $\Delta v_3$ 」と「電流値: I」との関係を図16に示す。(比較用に実験2の時の  $\Delta v_1$  と I の関係も示した)

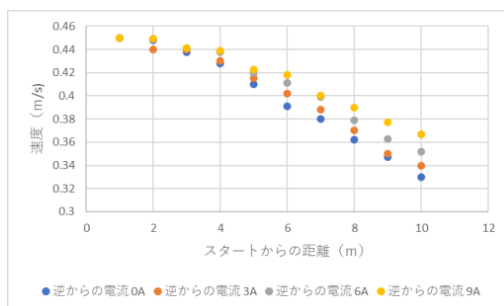


図15: 実験5の結果を平均で比較

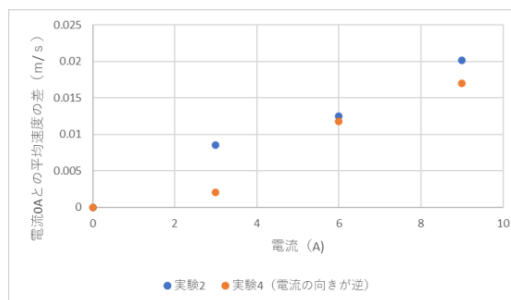


図16: 「 $\Delta v_3$ 」と「I」との関係

図によれば、この実験において一般に「負の速度差」は生じない。また、電流の大きさ(I)によらず、常に「 $\Delta v_3 \leq \Delta v_1$ 」が成立していることから、磁場の影響も多少はあると考えられるがそれ以上に影響を与えている要因があると分かる。

③ テスラメータを用いて各電流値において、中実鉄球周辺の平均の磁束密度を測定したところ、「電流無し(0A)が0.22 (mT)」、「3Aが0.22 (mT)」、「6Aが0.24 (mT)」、「9Aが0.26 (mT)」となり、値の大きな変化は見られなかった。また、電流9Aにおいて中実鉄球が受ける最大の電磁力(F)は、金属レールの軌間(1)が9mmであるから、次の式(8)のようになる。

$$F = IBl = 9 \cdot (2.6 \cdot 10^{-4}) \cdot (9 \cdot 10^{-3}) = 2.1 \cdot 10^{-5} (N) \quad (8)$$

この力は、表9の地点n-n+1間(距離1.5m)で中実鉄球にはたらく摩擦力の大きさ( $f_n$ :単位はN)に比べて、非常に小さい。

ゆえに、仮説2(磁場による影響)は主要因である可能性が低いと考えられる。

## 3.6 実験6: 仮説3及び電流動球現象の「力学的エネルギー」に関する検証

### 3.6.1 概要・仮説

電流動球現象を利用してある決められた区間内を往復する「電流動球振り子(図17参照)」を用いて、中実鉄球を走らせた時、振り子の中心点を通る中実鉄球の速さ及び中実鉄球の力学的エネルギーの和の推移を見る。



図17: 「電流動球振り子」の様子

仮説3が正しいとすれば、電流動球振り子において、金属レールの上で電流を流した時中実鉄球の力学的エネルギーの和が増加することは起こらないと考えられる。

### 3.6.2 実験方法

① 鉄道模型用の「フレキシブルレール(軌間9mm・全長80cm)」を中央から両端に向けて地面とレールがなす角が常に $2^\circ$ になるように設置する。中央にビースピを設置する。(図14参照) レールの一端に定電流電源

装置を設置する。

② 斜面上で中実鉄球(直径 3cm・質量 111 g)を、スタートの位置の地面からの高さが 0.2 cmとなる地点から走らせる。中実鉄球を走らせた瞬間から、直流電流を 0A・3A・6A・9A の 3 段階に分けてレールに流す。その後、移動方向に関係なく中実鉄球がビースピを通過するごとに、1 回につき合計 14 回通過するまで速さの値を読み取る。これをそれぞれ 5 回繰り返し、速さの推移を比較する。

### 3.6.3 実験結果と考察

① 実験結果を図 18 に示す。

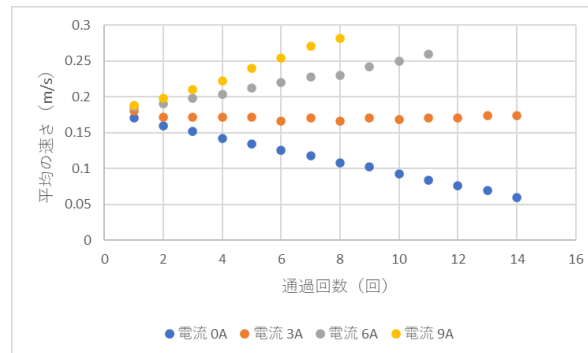


図 18：実験 6 の結果を平均で比較

② 電流 9A の場合、1 回目の中央の通過時点の平均の力学的エネルギーの和（並進運動・回転運動のエネルギーの和）は「0.025J」、8 回目の中央の通過時点の平均の力学的エネルギーの和（並進運動・回転運動のエネルギーの和）は「0.057J」となるため 2 倍以上に増加した。同様のことは電流 6A の場合にも言えるため、この現象は偶然ではないと思われる。力学的エネルギーの増加があったということは、新たに何らかの力が中実鉄球に対し正の仕事をしたということになると考えられる。このことから、「摩擦力などの、電流を流さない状態で中実鉄球にはたらく運動を妨げる力の減少」を原理とするのは妥当ではなく、仮説 3 は成立しない可能性が高い。

## 4 おわりに

今回の研究では、電流動球現象の存在を確認し、「電流値依存性」「速度依存性」があることを示した。また、原理の主要因の説明として「熱膨張の影響」「電流による磁場の影響」「摩擦の減少」はいずれも正しくない可能性が高い。実験 6 の電流を流した時に力学的エネルギーを増加させた力の正体とは何かが分からないという結論になった。この現象は、「電流」を流した時に見られることから「電子の動き」が密接に関わっているはずである。したがって、マクロな視点では想像もつかないような中実鉄球やそれに接している金属レールの複雑な電子の動きが解明できれば主要因の解明につながる可能性が高いと考えられる。

## 5 今後の課題

今後は、「熱膨張のモデル化の高精度化」「金属球や金属レールの温度などの初期条件が電流動球現象に与える影響」「熱膨張を確認する装置の開発」「今回見られた電流動球現象はあくまで球の回転運動と並進運動におけるものであったが、並進運動のみでも同様のことが起きるのか」「球やレールの金属を変えた時にどうなるのか」「中実鉄球ではなく中空鉄球ならばどうなるのか」「応用性」「効率化」を調べていきたい。

〈参考文献〉

\*1 『Heat considered as a mode of motion』(主に p.119～p.120) Tyndall John 著  
<https://archive.org/details/heatconsideredas00tyndrich>

\*2 『洋白』 株式会社 KIYOMINE  
<https://www.kiyomine.co.jp/product/nickel/>