

トライボ教育用実験教材の開発

藤本 隆士*・佐々木秀彰**

Development of tribology educational experiment equipment

Takashi Fujimoto*, Hideaki Sasaki**

Abstract

In this study, to attempt to deepen understanding of tribology lectures by combining them with experiment is described. New equipment was developed to use in Engineering experiments 2. Furthermore, a experimental guide book was written to deepen understanding of the experiment for students. A statistical analysis was introduced in the guide book to evaluate between mean values obtained by the experimental results.

1. はじめに

本校のカリキュラムでは、専門科目は、座学とそれに対応する実習・実験が対になっていることが多い。例えば、加工学に対応するものとして、旋盤やフライス盤の実習や、工学実験の中の切削に関するテーマがあり、その他の科目に関しても講義と実習実験が対応しているものが多い。

トライボロジーに関する科目としては、本校では旧カリキュラムでは4年次に、新カリキュラムでは5年次に選択科目として表面工学を用意している。しかし、それに対応する実験や実習は行われていない。

そこで、座学で学んだ内容をより深く理解するために、摩擦や摩耗に関する工学実験のテーマを考え、その工学実験で使用する実習用の実験装置を製作することにした。同時に、本実験装置の開発を、専攻科の特別研究のテーマとして扱うことで、専攻科生の創造性を育む試みとした。

実験装置の製作にあたり、最初に専攻科の学生とともに、手書きで様々なアイデアを出して少しずつ形にしていくことから始めていき、最終的には、床材や球の材質、球の重さや大きさ等を変えながら、球を転がして転がり時間を測定する装置を製作することにした。

これにより、摩擦力の三大要因である凝着、掘り起こし、弾性ヒステリシス損失のうち凝着と弾性ヒステリシス損失に関する影響を実験で確認するこ

とができると考えられる [1].

さらに実験の目的や実験手順をより分かりやすくするために、実験手引きを作成することにした。また、実験手引きにしたがって予備実験およびデータ処理を行い、手引きを改良して完成させ、実際の工学実験に使用した。

2. 実験装置の製作

装置を製作するにあたって、コンセプトに沿ったアイデアを出し、それを元に大まかな手描きのデザインを作り、さらに、概要設計、詳細設計を行った。それと同時に、必要部品や材料のリストを作り購入、加工し製作することにした。

実験装置のアイデアを出す際、「トライボロジーに関する工学実験のテーマ」「座学の理解を深める」という2つをコンセプトをもとにアイデアを考え、その中で、「トライボロジーに関する工学実験のテーマ」のひとつとして、摩擦について実験できる滑り台が挙がった。滑り台は、物体の滑り始める角度を測定し、摩擦係数を求めることができるが、物理の例題等にもよく取り上げられているものであるため、今回は、転がり摩擦について実験する装置を製作することにした [2]。これに関する実験手順書を作成することで工学実験のテーマとして使用できる。また、座学だけで学んだ知識では定着しにくいいため、実際に実験を行うことで少しでも理解が深まると考えられる。

最初に出てきたアイデアのうち、いくつかを図

* 弓削商船高等専門学校電子機械工学科

** 弓削商船高等専門学校専攻科生産システム工学専攻

トライボ教育用実験教材の開発

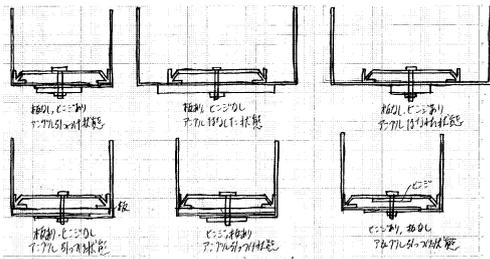


図3 アイデア5

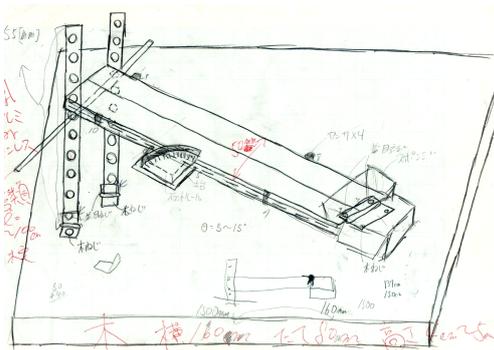


図4 装置概要図

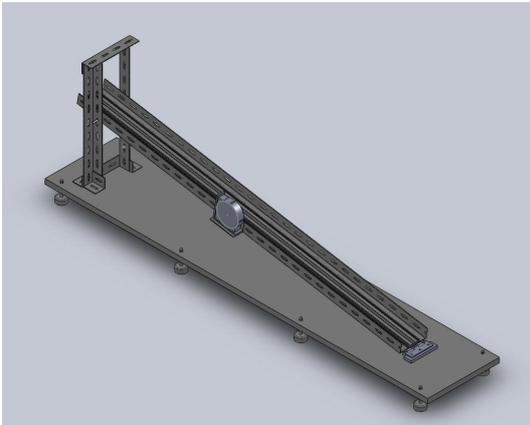


図5 ソリッドワークスにより作成した3D図面



図6 実験装置完成写真

表1 改良前の実験データ表の一部(レール角度2°)

斜面の角度: 2°				
	回数	時間(球1)	回数	時間(球2)
右	1	2.54	1	2.87
	2	2.69	2	2.84
	3	2.63	3	2.84
右レールの平均			2.74	
摩擦係数			-3.30×10^{-3}	
左	1	2.90	1	2.59
	2	2.94	2	2.62
	3	2.88	3	2.63
左レールの平均			2.76	
摩擦係数			-2.61×10^{-3}	

表2 実験条件

球	φ15mm 軸受け用鋼球(2種類)
レール	アルミ, ゴム
レール角度	1°, 2°, 4°, 6°

計測する。

- 球を変えて複数回測定する。
- 同様に、左のアルミレールでも2つの球の転がり時間を測定する。
- 斜面角度を変更し、同様に測定を行う。
- 式(1)より摩擦係数を求める。

■実験2

- 斜面角度を一番小さいものにし、角度を測定する。
- 右のレールにゴムの板を敷く。
- 球とレールをエタノールで洗浄する。
- 実験1と同様に、左右レールの転がり時間を測定する。
- ゴム板を左のレールに変え、同じ実験を行う。
- 斜面角度を変更し、同様に測定を行う。
- 式(1)より摩擦係数を求める。

$$\mu = \tan \theta - \frac{2.8}{gt^2 \cos \theta} \quad (1)$$

3.3 予備実験結果および実験手引きの改良

表1は、実験手引き書に従い予備実験を行った結果の一部を示したものである。また、図7は、これらのデータを基にプロットしたものである。横軸がレール角度、縦軸が転がり時間、プロットの○がゴムレール上を転がした場合、△がアルミレール

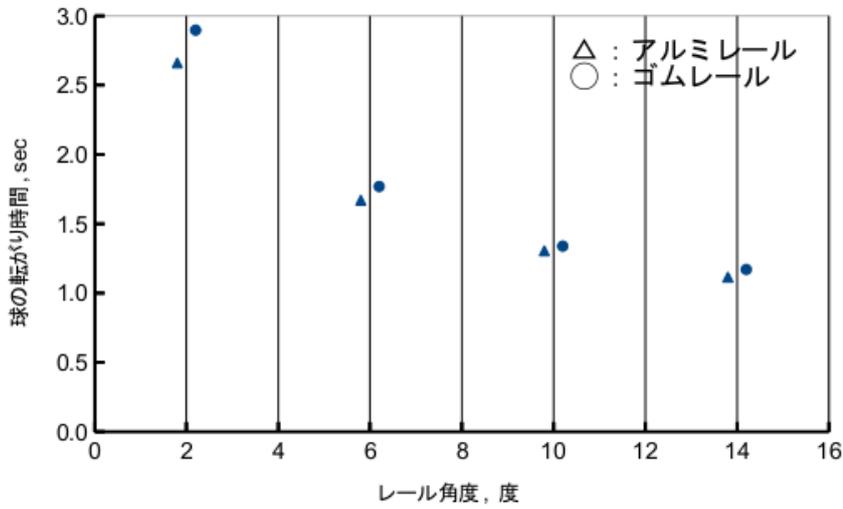


図 7 実験データのプロット例

表 3 標準偏差を求めるための作業用の表

球 1 斜面角度 1°					
データ	測定データ X_i	Ave	$X_i - Ave$	$(X_i - Ave)^2$	$S_1^2 = \frac{\Sigma(X_i - Ave)^2}{\text{データ数}-1}$
左 (アルミ)1					
2					
3					
4					
(途中省略)					
10					
右 (アルミ)1					$S_1 = \sqrt{\frac{\Sigma(X_i - Ave)^2}{\text{データ数}-1}}$
2					
3					
4					
(途中省略)					
10					
データ数 $n_1 =$			$\Sigma(X_i - Ave)^2$		

上を転がした場合である。角度が大きいほど転がり時間が短くなる。また、角度が小さいときは、ゴムレールとアルミレールでの差が大きい。角度が大きくなるにつれて差が小さくなっていくことが分かる。

実際には、このグラフから、アルミレールの場合とゴムレールの場合とで、転がり時間に有意差があるかどうかを読み取るのは難しかった。傾斜角度が大きくなる程、データのばらつきが大きくなること、また、表から統計処理しようとしても、転がす回数が 3 回ずつと少なく、統計結果がうまく得ら

れなかった。さらに、データのばらつきによっては、摩擦係数が大きく変わるため、工学実験では摩擦係数の比較ではなく、転がり時間の比較を行うこととした。

最終的な実験条件を表 2 に示す。

データ数が多い方が統計結果が正確になるため、工学実験の時間内で終わらせることも考え、球の転がり回数は 10 回ずつとし、また、レール角度も 1°, 2°, 4°, 6° とすることにした。

また、工学実験の時間内で検定をしやすくするた

トライボ教育用実験教材の開発

表4 検定を行うための作業用の表

左(アルミ), 右(アルミ)の場合		
斜面角度 1°	分散値 S ₁	分散値 S ₂
データ		
$F = \frac{S_1^2}{S_2^2}$		
	$ Av_1 - Av_2 $	$\sqrt{\frac{1}{\text{データ数}} + \frac{1}{\text{データ数}}}$
データ		
$t = \frac{X_1 - X_2}{\sqrt{S \left(\frac{1}{\text{データ数}} + \frac{1}{\text{データ数}} \right)}}$		

表5 改良後の実験データ表

斜面の角度: 2°					
球1 左アルミレール			球1 右アルミレール		
回数 n ₁	測定時間 x _i	二乗した値 (x _i - \bar{x}) ²	回数 n ₂	測定時間 x _i	二乗した値 (x _i - \bar{x}) ²
1	2.33	4.356×10 ⁻³	1	2.42	0.196×10 ⁻³
2	2.34	3.136×10 ⁻³	2	2.39	1.936×10 ⁻³
3	2.45	2.916×10 ⁻³	3	2.36	5.476×10 ⁻³
4	2.45	2.916×10 ⁻³	4	2.45	0.256×10 ⁻³
5	2.38	0.256×10 ⁻³	5	2.52	7.396×10 ⁻³
6	2.40	0.016×10 ⁻³	6	2.50	4.356×10 ⁻³
7	2.49	8.836×10 ⁻³	7	2.45	0.256×10 ⁻³
8	2.36	1.296×10 ⁻³	8	2.38	2.916×10 ⁻³
9	2.34	3.136×10 ⁻³	9	2.48	2.116×10 ⁻³
10	2.42	0.576×10 ⁻³	10	2.39	1.936×10 ⁻³
平均値 $\bar{x} = 2.396$	合計 $\sum(x_i - \bar{x})^2 = 24.524 \times 10^{-3}$		平均値 $\bar{x} = 2.434$	合計 $\sum(x_i - \bar{x})^2 = 26.84 \times 10^{-3}$	

$$\text{分散: } S_1^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n_1 - 1} = 3.0489 \times 10^{-3}$$

$$\text{分散: } S_2^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n_2 - 1} = 2.9822 \times 10^{-3}$$

$$F \text{ 検定: } F = \frac{S_1^2}{S_2^2} = 1.0223546945$$

め, 各実験条件ごとに, 作業用の表3を用意した。表は球1を用いて左右のアルミレールの比較を行う際に用いるものの一例である。表に従って計算することで, 検定に必要な標準偏差を求めることができる。更に計算した標準偏差を用いて, 表4に従って計算することで検定が行える。

以上の予備実験を数回繰り返し, 手引きの改良を重ね, その結果データ処理を簡単に行えるような表を作成した。完成した表の一部を表5に示す。

作業用の表を使うと, データを転記する際に, そこでのミスが生じることがあった。そのため, データを記入する表はひとつにし, さらに表の各セルに説明や式を加え, 実験と統計処理を効率よく行えるように工夫した。

この表に球1の転がり時間を角度別に記入して

いく。また, 同様の表を用いて, 球2の場合と実験2のゴムレール上を転がした場合のデータを記入させる。

表1の左右を比較することで, 左右のアルミレールで有意差があるかを検討し, 表1とゴムレールの場合の表を比較することで, アルミレールとゴムレールとで有意差があるかが検討できる。さらに, 球1と球2を比較することで, 球の表面粗さの影響が比較できる。

4. 検定方法

検定とは平均値の差を比較したり, データから真値を推定し, その値が確率的に充分正しいものかどうかを判断するときに使われる方法である [3, 4]。

検定の種類には, 相関比の検定, 母比率の差の検定, 独立性の検定, カイ二乗検定, F検定, t検定

弓削商船高等専門学校 紀要 第 36 号 (平成 25 年)

表 6 F 分布表

F 分布表 (P=0.05)

df1=1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	30
df2=1	161.50	199.50	215.71	224.60	230.20	234.00	236.80	238.90	240.50	241.90	243.90	246.00	248.00
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66
4	7.71	6.99	6.63	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15
9	5.12	4.26	3.87	3.63	3.49	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07
24	4.27	3.42	3.03	2.80	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93

t 分布表

t 分布表		P=0.05		0.01	
df	1	2	3	4	5
1	6.314	3.078	2.777	2.576	2.447
2	2.924	1.886	1.638	1.508	1.401
3	2.353	1.638	1.401	1.282	1.190
4	2.132	1.533	1.282	1.171	1.083
5	2.015	1.476	1.250	1.140	1.054
6	1.943	1.435	1.219	1.108	1.024
7	1.895	1.401	1.189	1.083	1.000
8	1.858	1.371	1.161	1.057	0.975
9	1.833	1.345	1.136	1.035	0.953
10	1.810	1.321	1.113	1.014	0.933
11	1.789	1.299	1.091	0.994	0.914
12	1.770	1.279	1.070	0.975	0.895
13	1.753	1.261	1.050	0.957	0.877
14	1.738	1.245	1.031	0.940	0.861
15	1.724	1.231	1.013	0.924	0.846
16	1.711	1.218	0.996	0.909	0.831
17	1.699	1.206	0.980	0.894	0.816
18	1.688	1.195	0.965	0.880	0.803
19	1.678	1.185	0.951	0.866	0.789
20	1.669	1.176	0.938	0.853	0.776
21	1.661	1.167	0.926	0.841	0.764
22	1.653	1.159	0.914	0.829	0.752
23	1.646	1.151	0.903	0.818	0.741
24	1.639	1.143	0.892	0.807	0.730
25	1.633	1.136	0.882	0.797	0.720
26	1.627	1.129	0.872	0.787	0.710
27	1.621	1.122	0.862	0.778	0.700
28	1.616	1.115	0.853	0.769	0.690
29	1.611	1.108	0.844	0.760	0.681
30	1.606	1.101	0.835	0.751	0.672

等があるが、今回の実験では F 検定を用いる。
 F 検定, t 検定は、それぞれ式 (2) (4) で表すことができる。
 図 8 はデータ処理の結果から平均値に差があるかどうかを求めるまでの流れを表している。自由 F 検定を使用して二つの分布が等分散かつ正規分布であるかどうかを調べ、等分散でない場合は、二つの分布の平均に差異があるかを調べる。

図 8 はデータ処理の結果から平均値に差があるかどうかを求めるまでの流れを表している。自由 F 検定を使用して二つの分布が等分散かつ正規分布であるかどうかを調べ、等分散でない場合は、二つの分布の平均に差異があるかを調べる。

等分散かつ正規分布でない場合は、t 検定の代わりに式 (6) の welch 検定を用いる。自由度は表 7 に示す F 分布図表, t 分布図表で用いる。それぞれの検定についてその特徴と式を示す。

トライボ教育用実験教材の開発

- F 検定 : 二つの分布が等分散かつ正規分布かどうかを調べる.

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (2)$$

ここで, S^2 は分散である. また自由度 df は次のようになる.

$$df = n - 1 \quad (3)$$

- t 検定 : 二つの分布の平均に差異があるかを調べる.

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{S \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} \quad (4)$$

ここで, S は標準偏差, \bar{X} は平均値, n_1, n_2 はデータ数である. また自由度 df は次のようになる.

$$df = n_1 + n_2 - 2 \quad (5)$$

- welch 検定 : F 検定で等分散とみなせなかった場合, welch 法を使う. 計算方法は t 検定とほとんど同じで, t 値と自由度 df を求める計算式が違う.

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{S \left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2} \right)}} \quad (6)$$

ここで, S^2 は分散, \bar{X} は平均値, n_1, n_2 はデータ数. また自由度 df は次のようになる.

$$df = \frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2} \right)^2}{\frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1} \right)^2}{n_1 - 1} + \frac{\left(\frac{S_2^2}{n_2} \right)^2}{n_2 - 1}} \quad (7)$$

5. 実験手引き改良後の実験結果および考察

工学実験では, 左右のアルミレールに差がないことを確認するため, 実験 1 として, 同じ球を用いて, 左アルミレール上と右アルミレール上の転がり時間の平均値の検定を行う. 左右のレールで差が

表 8 左アルミレールと右アルミレールの検定結果

角度	F 検定の結果	t 検定の結果	平均値の差
1°	F=1.359	t=0.580	無し
2°	F=1.858	t=0.236	無し
4°	F=1.174	t=0.086	無し
6°	F=1.393	t=0.003	無し

ないことを確認した後, アルミレールとゴムレールとの差と, 球 1 と球 2 との差を検定する.

改良後の工学実験の手引きに沿って実験と検定を行い, 手引きの手順が適切かどうかを確認した.

手引き通りに実験し, 表に記入し, 検定した結果の一例を表 8 に示す.

ここでは, 球 1 を用いて左右のアルミレールを 10 回ずつ転がし, その結果を表 5 に記入し, 表にしたがって分散を求め, F 検定をした. F 分布表 6 と t 分布表 7 を用いて, 左右のアルミレール上を転がしたときの転がり時間の平均値に有意差が有るかを検定している.

同じ条件の実験を左右のレールで 10 回ずつ行っているため, データ数 n_1, n_2 は, 両方とも 10 となり, F 検定で用いる自由度 df は, 式 (3) より df_1, df_2 ともに 9 となる. また t 検定で用いる自由度 df は式 (5) より 18 となる.

表 6 の F 分布表より, $df_1 = 9, df_2 = 9$ の値である $F=3.18$ 以下であれば t 検定を行うことができ, 表 7 より $df=18$ の値である $t=2.101$ 以下になれば 95% の確率で, 転がり時間の平均値に差はないことが分かる. 表 8 の検定結果より左レール, 右レールで転がり時間の平均値に差が無いことがわかる.

さらに, これらの表を用いて, アルミレールとゴムレールとで転がり時間の平均値に有意差が有るかの検定を行った結果が表 9 である.

この結果は, 球 1, 球 2 を用いてゴムレールとアルミレールの差の検定を行ったもので, 上述のように, 今回の実験では $df_1 = df_2 = 9$ となり, 式 (5) から, F 分布表 $df_1 = 9, df_2 = 9$ の欄を読み取り, F 検定の結果が $F=3.18$ 以下のとき t 検定を行い, それ以上ならば, welch 検定を行う. さらに t 分布表 $df=18$ の欄から $t=2.101$ 以下であれば平均値に差はないことが分かる. 球 1 の 2° の場合 $F=3.460$ となり t 検定が適用できないため, welch 検定を用いて $t=0.631$ を求めている.

以上の結果より, 表 9 から, 角度が小さい時は, 転がり時間に差があり, 角度が大きいときは, 差が

弓削商船高等専門学校 紀要 第36号 (平成25年)

表9 球1, 球2のゴムレールとアルミレールの差

レール角度	球1			球2		
	F検定	t検定	平均値の差	F検定	t検定	平均値の差
1°	F=3.147	t=2.458	有	F=3.114	t=2.49	有り
2°	F=3.460	t=0.631	無し (welch)	F=2.372	t=2.258	有り
4°	F=1.379	t=0.086	無し	F=1.169	t=0.155	無し
6°	F=1.091	t=0.086	無し	F=1.143	t=0.013	無し

なくなることが分かる。

6. おわりに

トライボロジーの講義に対応する工学実験の内容として転がり摩擦の実験装置を考え、アイデア出しから設計、加工を行って実験装置を製作した。また、実験手引きを作成した。

作成した手引きにしたがい予備実験を行い、実験条件、実験の目的や実験手順をより分かりやすくするために、手引きの改良を行った。

その過程で、角度が大きくなると転がり時間の差がなくなり、実験データのグラフからでは何度から差がなくなるのかが明確には判断できなくなることがわかったため、検定を用いて判断することにした。

実験手引きの充実を図り検定を取り入れたが、学生に検定の知識が必要となってくる為、検定を簡単に行えるよう作業用の表を作成し、それに従って計算していくことで、検定の知識がなくても効率よく実験が行えるよう工夫した。

しかし、作業用の表を用いたことで転記ミスを生じることがあったため、データを記入する表はひとつとし、表のセル内に説明や式を加えることにした。

その結果、手引きにしたがって実験を行い、作業用の表にしたがって計算を行うことで、工学実験の時間内に実験と検定が行えるような手引きを作成することができた。

これにより、角度や材質の違いで球の転がり時間の平均値に差があるのかを、検定を用いて明確に表すことが可能となった。

レールの床が平面で、レールに壁があるため、蛇行して転がり時間に影響が出るのではないかなどの懸念があった。改善点としてレールを半円筒型にするなどの対策があがったが、実験結果からレール1とレール2で差がなかったため、平均値の比較などに関しては影響がないと考えている。

今回製作した実験装置と実験手引き書は、5年生の工学実験2で使用されている。

参考文献

- [1] トライボロジー入門：岡本純三・中山景次・佐藤晶夫，幸書房
- [2] ころがり摩擦のメカニズム：水原和行，日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集（新潟2003-11）
- [3] 統計概論：所一夫，槇書店
- [4] 確率統計：田河生長，大日本図書