

理科教材研究 Ⅲ

「斜面を転がる円柱の実験」

前川智・エマニュエル マカラエグ・林超・秋山博臣・恵下敏

Study on Teaching Materials for Science Education, Ⅲ
“Experiment with a Cylinder Rolling down on a Slope”

Satoru MAEKAWA, Emmanuel MACARAEG, Chao LIN, Hiroomi AKIYAMA,
and Osamu EGE

要 旨

斜面を転がる円柱あるいは球の実験は、古くはガリレイのころから試みられており、今日でももっともポピュラーな実験教材の一つである。ここでは、実験教材をより有効なものにするために、実験環境や測定法について、①回転体と斜面の摩擦に注目して斜面のシートをいろいろ変えて試した、②時間測定をより正確にするため半自動計測にした、の2点を中心に取り組んだ。結果として、時間測定については一定の効果が認められたものの、斜面の素材をとり換えることについてはあまり大きな差異が見られなかった。他方で、高さの正しい測定あるいは水平面の確保はとても重要であり、これに対しては測定の際に左右を取り替えて誤差を相殺するなどの対応も必要であるが、回転体の蛇行や斜行などが起こらないように注意することもまた重要である。

The experiment with a cylinder or a ball rolling down on a slope has been done since the time of Galilei, and is also now positioning as one of the most popular educational materials. In order to make the material more effective, we repeated the experiment mainly in the two ways that ① we changed the sheets over the slope focusing the friction between rotator and slope, and ② on aiming the increase of the accuracy, we derived a semiautomatic system of time-measuring. It was resulted that the semiautomated system for measuring time was even recognizably effective, but there did not show any clear resultant distinctions among the sheets of the slope. While, it is so important to measure the heights and keep the experimental device on the level. On accounting these situations, it is necessary not only to exchange right hand side and left hand side of the device to offset the systematic error but also to avoid the rotator running zigzag or sidlingly.

1. はじめに

斜面を転がる円柱あるいは球を題材にした実験は、古くはガリレイのころから行われてきたが、今日それが実験教材として使われる頻度が低いように思われる。その原因の一つとして、「実験の精度があまりよくない」といった悩みもあると思われる。

そこで、実験用斜面の上で円柱あるいは球などの回転体を転がし、斜面上の一定の距離を回転体が転がり下りる時間と距離およびその高さ（高低差）を測定し、それらを用いて重力加速度を求める教材用実験を行い、正確な実験ができにくい原因について考えてみた。

この実験で正確な測定をするためには、円柱や球が滑ったり空回りすることなく斜面を静かに転がり下ることが重要であるが、実際に実験を行うと、わずかでも滑りや跳ねが生ずるためかゴロゴロと音がしたり、マットを敷くと今度は埋もれて進行方向に抵抗となる波を生じたり、まっすぐ転がらないで曲がったりもする。斜面を静かに滑ることなくまっすぐ転がり下りるという条件はなかなか実現することが難しいと思われる。また、回転体が転がる時間を手押しストップウォッチで測定すると、特にストップの時点でかなり誤差が混入するものと考えられる。この実験では水平面を確保することも非常に重要である。また、空気にも少し抵抗があるので、風が吹いてもその影響がでる。この他にも、はたして使用中の回転体が完全な形をしているか、あるいは斜面に問題はないか、こういった多くの要因が絡み合って正確な実験がなかなかできない原因を作っているのではないかと考えられる。

そこで、こういった原因を少しでも取り除くために、あるいははっきりさせるために、①斜面の材質として木・合成樹脂などを用いて、回転体と斜面の材質による影響について調べた、②回転体が転がり下りる時間の測定について、スタート時は手動で行うがストップ時は自動で行えるように工夫した。

2. 方法

(1) 斜面の素材研究

1つの実験用斜面を用いてさまざまな材質の斜面の実験ができるように、ベニヤ合板で構成した斜面（斜面の板がしなることがないように、側面を三角形の板でくさび状に補強している）に各素材のシートを敷くことで斜面の素材を替えて実験する方法をとった。今回は、もともとの教材である合板の斜面での実験と比較する形で、静かに転がり下りる・滑ることなく転がり下りる、という2つの観点に注目し、プラスチック板・トレーシングペーパー・シリコンラバー（1.0mm）・薄いウレタンラバー（1.1mm）・厚いウレタンラバー（2.1mm）の5種類の素材の斜面用シートを用いて実験を行った。

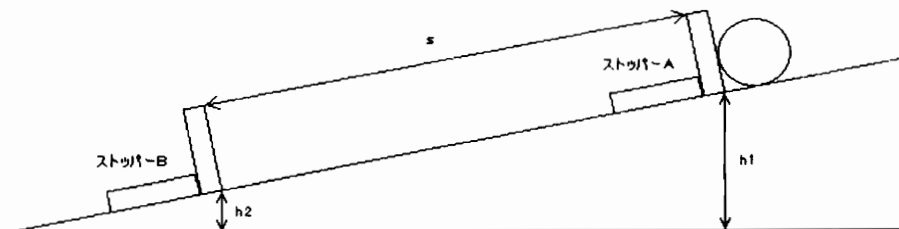


図1 斜面

直接測定値である測定時間が間接結果の重力加速度におよぼす影響について見てみる。円柱を転がす場合、求める重力加速度 g は円柱の質量や半径に関係なく

$$g = \frac{3s^2}{t^2(h_1 - h_2)} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 s は円柱が転がった斜面上の距離であり、 t は要した時間、 $(h_1 - h_2)$ は高低差である。

両辺の対数をとると

$$\log g = \log 3 + 2 \log s - 2 \log t - \log(h_1 - h_2) \quad (2)$$

となり、さらに両辺の微分をとって

$$\frac{dg}{g} = 2 \frac{ds}{s} - 2 \frac{dt}{t} - \frac{d(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_2)} \quad (3)$$

となる。このことから、間接計算の結果である重力加速度の比例誤差 dg/g へおよぼす影響は、比例誤差 $d(h_1 - h_2)/(h_1 - h_2)$ よりも、比例誤差 ds/s と dt/t が 2 倍の大きさに影響してることがわかる。したがって、斜面を転がり下りる時間 t とその距離 s の測定は、より精密に測る必要があると考えられる。

(2) 時間計測の改良

この実験で、距離 s に関しては斜面での距離を 1 m に設定している。その斜面距離に対する誤差は、あってもせいぜい 1 mm 前後である。これは 0.1% 程度の誤差であり、きちんと直定規を用いて測定しているので大きな誤差があるとは考えにくい。しかし、測定時間に関しては、測定時間の最大値と最小値の間に、10% 前後の差がみられるときがある。これは、円柱がストッパー A を離れた瞬間からストッパー B に衝突した瞬間までの時間を測定しなければならないため実験者はスタート・ストップボタンを視覚的にあるいは聴覚的に押すことになる。しかし、この方法では、タイミングのズレや実験者のクセなどの誤差が多く含まれると思われる。そのため、測定時間の測定回数を増やしても平均値の信頼度は上がらず、逆に雑な測定では誤差が大きくなる可能性もあると考えられる。

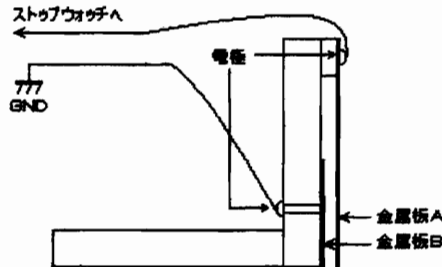


図2 ストッパーB

そこで、より精度の高い測定をするために、円柱がストッパー B に衝突すると同時に自動的に測定が止まるような自作のストップウォッチを作製した。これは、ストップウォッチのスター

表1 実験で使用した円柱・球のデータ

	アルミニウム			銅			鉄			球
	(大)	(中)	(小)	(大)	(中)	(小)	(大)	(中)	(小)	
質量(g)	259.6	132.1	55.9	874.2	446.6	187.8	765.0	391.2	165.6	286.2
直径(mm)	50.00	40.00	30.07	50.00	39.95	29.96	50.00	40.00	30.00	39.25
高さ(mm)	50.00	39.90	30.00	50.10	40.10	30.00	49.90	40.05	30.05	

これらの円柱・球を用いて改良前のストップウォッチで測定したベニヤ合板・プラスチック板・トレーシングペーパー・シリコンラバー(1.0mm)・薄いウレタンラバー(1.1mm)・厚いウレタンラバー(2.1mm)の各素材の斜面での測定結果を表2に、改良後のストップウォッチで測定したそれぞれの素材の斜面での測定結果を表3に示す。なお、測定は実験台の傾きによる系統誤差をなくすために斜面の向きを入れ替えそれぞれ20回ずつ測定し全体の平均値を最確値とした。

表2 ストップウォッチ改良前の測定結果

斜面距離(s)	1.00m
高低差①(h_1-h_2)	0.0658m
高低差②(h_1-h_2)	0.0658m

【ベニヤ合板】

	アルミニウム			銅			鉄		
	(大)	(中)	(小)	(大)	(中)	(小)	(大)	(中)	(小)
平均①	2.216	2.251	2.267	2.241	2.253	2.249	2.257	2.257	2.269
平均②	2.167	2.167	2.190	2.150	2.177	2.146	2.169	2.178	2.172
全体平均	2.191	2.209	2.228	2.196	2.215	2.197	2.213	2.217	2.220

【プラスチック板】

平均①	2.224	2.245	2.256	2.232	2.245	2.231	2.227	2.229	2.229
平均②	2.126	2.150	2.179	2.153	2.151	2.147	2.141	2.142	2.149
全体平均	2.175	2.197	2.217	2.192	2.198	2.189	2.184	2.185	2.189

【トレーシングペーパー】

平均①	2.262	2.243	2.268	2.273	2.273	2.261	2.271	2.267	2.264
平均②	2.182	2.163	2.192	2.175	2.175	2.171	2.180	2.171	2.167
全体平均	2.222	2.203	2.230	2.224	2.224	2.216	2.225	2.219	2.215

【シリコンラバー(1.0mm)】

平均①	2.280	2.272	2.291	2.304	2.292	2.273	2.291	2.298	2.281
平均②	2.170	2.170	2.188	2.199	2.200	2.169	2.209	2.188	2.170
全体平均	2.225	2.221	2.239	2.252	2.246	2.221	2.250	2.243	2.225

【薄いウレタンラバー(1.1mm)】

平均①	2.279	2.285	2.317	2.299	2.311	2.292	2.302	2.288	2.296
平均②	2.228	2.218	2.248	2.226	2.235	2.221	2.235	2.234	2.216
全体平均	2.253	2.251	2.282	2.262	2.273	2.256	2.268	2.261	2.256

【厚いウレタンラバー(2.1mm)】

平均①	2.328	2.317	2.338	2.306	2.310	2.298	2.323	2.297	2.293
平均②	2.233	2.234	2.257	2.237	2.242	2.233	2.243	2.223	2.229
全体平均	2.280	2.275	2.298	2.271	2.276	2.265	2.283	2.260	2.261

表3 ストップウォッチ改良後の測定結果

【ベニヤ合板】

	アルミニウム			銅			鉄			球
	(大)	(中)	(小)	(大)	(中)	(小)	(大)	(中)	(小)	
平均①	2.230	2.234	2.264	2.224	2.237	2.238	2.237	2.233	2.251	2.161
平均②	2.161	2.162	2.181	2.142	2.165	2.165	2.151	2.156	2.161	2.095
全体平均	2.195	2.198	2.222	2.183	2.201	2.202	2.194	2.194	2.206	2.128

【プラスチック板】

平均①	2.205	2.210	2.222	2.197	2.209	2.212	2.197	2.197	2.207	2.118
平均②	2.145	2.150	2.157	2.121	2.143	2.141	2.118	2.139	2.152	2.043
全体平均	2.175	2.180	2.189	2.159	2.176	2.176	2.157	2.168	2.179	2.080

【トレーシングペーパー】

平均①	2.238	2.247	2.283	2.226	2.231	2.236	2.242	2.242	2.239	2.182
平均②	2.151	2.156	2.192	2.145	2.148	2.153	2.159	2.152	2.159	2.100
全体平均	2.194	2.201	2.237	2.185	2.189	2.194	2.201	2.197	2.199	2.141

【シリコンラバー(1.0mm)】

平均①	2.242	2.243	2.251	2.258	2.244	2.236	2.262	2.251	2.246	2.219
平均②	2.157	2.164	2.178	2.181	2.170	2.156	2.172	2.167	2.164	2.141
全体平均	2.199	2.203	2.214	2.219	2.207	2.196	2.217	2.209	2.205	2.180

【薄いウレタンラバー(1.1mm)】

平均①	2.270	2.259	2.307	2.270	2.273	2.267	2.278	2.268	2.275	2.241
平均②	2.186	2.187	2.218	2.195	2.200	2.202	2.199	2.194	2.198	2.169
全体平均	2.228	2.223	2.262	2.232	2.236	2.234	2.238	2.231	2.236	2.205

【厚いウレタンラバー(2.1mm)】

平均①	2.283	2.290	2.309	2.257	2.291	2.287	2.262	2.282	2.287	2.235
平均②	2.190	2.187	2.22	2.186	2.209	2.207	2.185	2.196	2.203	2.168
全体平均	2.236	2.241	2.264	2.221	2.250	2.247	2.223	2.239	2.245	2.202

4. 結果

これらの実験から得られた測定値より重力加速度について求めたものを、比較のために改良前のストップウォッチを使用した結果を表4に、改良後のストップウォッチを使用した結果を表5にそれぞれ示す。参考のために、宮崎(北緯31° 55'、高さ7 m)での重力加速度は、979.428 [cm/s²]となっている。

表4 ストップウォッチ改良前

重力加速度	アルミニウム			銅			鉄		
	(大)	(中)	(小)	(大)	(中)	(小)	(大)	(中)	(小)
ベニヤ合板	9.49536	9.34338	9.18264	9.45864	9.29493	9.44572	9.31174	9.27607	9.24893
プラスチック板	9.63778	9.44357	9.27398	9.48886	9.43928	9.51489	9.56289	9.54976	9.51707
トレーシングペーパー	9.23437	9.39647	9.17235	9.21777	9.21984	9.28654	9.20742	9.26353	9.29073
シリコンラバー	9.21155	9.24477	9.09467	8.99397	9.04210	9.24685	9.00797	9.06227	9.20742
薄いウレタンラバー	8.98001	8.99597	8.75516	8.91067	8.82851	8.95614	8.86163	8.92052	8.96210
厚いウレタンラバー	8.77053	8.80912	8.63743	8.83823	8.80138	8.88512	8.74941	8.92842	8.92250

表5 ストップウォッチ改良後

重力加速度	アルミニウム			銅			鉄			球
	(大)	(中)	(小)	(大)	(中)	(小)	(大)	(中)	(小)	
ベニヤ合板	9.46079	9.43928	9.23229	9.56946	9.41142	9.40715	9.47589	9.46941	9.37093	10.38864
プラスチック板	9.64221	9.59582	9.51272	9.78342	9.62892	9.62892	9.79703	9.70235	9.60242	10.92438
トレーシングペーパー	9.47157	9.40928	9.10891	9.54758	9.51272	9.46941	9.41570	9.44572	9.42855	10.33891
シリコンラバー	9.42641	9.39221	9.29912	9.25727	9.36032	9.45648	9.28025	9.34338	9.38156	9.95164
薄いウレタンラバー	9.18470	9.23022	8.90870	9.15181	9.11706	9.13339	9.10077	9.16412	9.11910	9.69622
厚いウレタンラバー	9.11706	9.07845	8.89493	9.24061	9.00797	9.03405	9.22399	9.09874	9.04814	9.70083

表4の結果から斜面の材質による多少のちがいはみられるものの、同じ素材の斜面でもそれぞれの円柱による結果の値の差が大きく全体的にバラバラである。それに比べて表5の結果からは同じ素材の斜面では各円柱で近い値の結果が得られ、また、全体的に理論値に近づいたことがわかる。しかし、球では重力加速度が速く出ている。これは、円柱に比べて球の表面が非常に滑らかな上に斜面と接する面積が小さいために摩擦が少なく滑りながら転がり下りるためと考えられる。ここで、ストップウォッチを改良したことでどれだけ測定時間の精度が上がったかを、ストップウォッチの改良前と改良後を比較するかたちで斜面ごとに円柱のそれぞれの平均二乗誤差を表6に、平均値の平均二乗誤差を表7に、表8には球のそれを示す。

表6 平均二乗誤差

	アルミニウム			銅			鉄		
	(大)	(中)	(小)	(大)	(中)	(小)	(大)	(中)	(小)

【ベニヤ合板】

ストップウォッチ改良前

平均①	0.02479	0.03145	0.02555	0.01841	0.01997	0.02151	0.02100	0.02780	0.01711
平均②	0.02452	0.01735	0.01549	0.02098	0.02027	0.02312	0.02351	0.01894	0.01749

ストップウォッチ改良後

平均①	0.01414	0.01062	0.01715	0.00970	0.00954	0.00927	0.01062	0.01005	0.01023
平均②	0.01071	0.01122	0.01499	0.01388	0.01204	0.01162	0.01532	0.00921	0.01179

【プラスチック板】

ストップウォッチ改良前

平均①	0.02437	0.02132	0.02871	0.01905	0.02179	0.02234	0.01682	0.02886	0.02189
平均②	0.01530	0.01581	0.02455	0.02605	0.02681	0.02390	0.02559	0.02056	0.02414

ストップウォッチ改良後

平均①	0.01244	0.01342	0.01314	0.01062	0.00995	0.00963	0.01487	0.01236	0.00910
平均②	0.00921	0.01284	0.01382	0.01091	0.01005	0.01071	0.01043	0.01221	0.01652

【トレーシングペーパー】

ストップウォッチ改良前

平均①	0.02462	0.02124	0.02586	0.01706	0.01847	0.02606	0.01814	0.01982	0.02596
平均②	0.01600	0.02299	0.02393	0.01658	0.02312	0.01284	0.02156	0.01830	0.01276

ストップウォッチ改良後

平均①	0.00887	0.01236	0.01054	0.00735	0.00865	0.01071	0.00678	0.00748	0.00768
平均②	0.00921	0.00970	0.01108	0.00921	0.00927	0.01005	0.00995	0.01030	0.00995

【シリコンラバー(1.0mm)】

ストップウォッチ改良前

平均①	0.01465	0.02159	0.02397	0.01934	0.02220	0.01972	0.02061	0.02088	0.01729
平均②	0.01871	0.01936	0.02755	0.02406	0.01465	0.02495	0.02022	0.02064	0.01962

ストップウォッチ改良後

平均①	0.01166	0.00781	0.01596	0.01122	0.01114	0.00973	0.01195	0.01179	0.00805
平均②	0.00853	0.01014	0.01249	0.01284	0.00894	0.00917	0.01195	0.01187	0.01108

【薄いウレタンラバー(1.1mm)】

ストップウォッチ改良前

平均①	0.02809	0.02784	0.02286	0.01956	0.02061	0.01905	0.01652	0.01568	0.02202
平均②	0.01813	0.01639	0.02321	0.02269	0.01802	0.02809	0.01987	0.02372	0.02291

ストップウォッチ改良後

平均①	0.01095	0.01195	0.01740	0.00865	0.01337	0.00910	0.00980	0.00536	0.01117
平均②	0.01114	0.01276	0.01860	0.00973	0.01581	0.01364	0.00910	0.01526	0.01135

【厚いウレタンラバー(2.1mm)】

ストップウォッチ改良前

平均①	0.02299	0.02833	0.02358	0.02711	0.01871	0.02441	0.01841	0.02410	0.02547
平均②	0.02256	0.02435	0.02610	0.02777	0.02112	0.01997	0.01646	0.02487	0.01905

ストップウォッチ改良後

平均①	0.01552	0.01687	0.01590	0.01424	0.01203	0.01195	0.00927	0.01590	0.01520
平均②	0.01322	0.01639	0.01532	0.01114	0.01578	0.01459	0.00973	0.01746	0.01670

表7 平均値の平均二乗誤差

	アルミニウム			銅			鉄		
	(大)	(中)	(小)	(大)	(中)	(小)	(大)	(中)	(小)

【ベニヤ合板】

ストップウォッチ改良前

平均①	0.00554	0.00703	0.00571	0.00412	0.00447	0.00481	0.00470	0.00622	0.00383
平均②	0.00548	0.00388	0.00346	0.00469	0.00453	0.00517	0.00526	0.00424	0.00391

ストップウォッチ改良後

平均①	0.00316	0.00237	0.00383	0.00217	0.00213	0.00207	0.00237	0.00225	0.00229
平均②	0.00240	0.00251	0.00335	0.00310	0.00269	0.00260	0.00343	0.00206	0.00264

【プラスチック板】

ストップウォッチ改良前

平均①	0.00545	0.00477	0.00642	0.00426	0.00487	0.00499	0.00376	0.00645	0.00489
平均②	0.00342	0.00354	0.00549	0.00583	0.00600	0.00534	0.00572	0.00460	0.00540

ストップウォッチ改良後

平均①	0.00278	0.00300	0.00294	0.00237	0.00222	0.00215	0.00332	0.00276	0.00203
平均②	0.00206	0.00287	0.00309	0.00244	0.00225	0.00240	0.00233	0.00273	0.00369

【トレーシングペーパー】

ストップウォッチ改良前

平均①	0.00550	0.00475	0.00578	0.00381	0.00413	0.00583	0.00406	0.00443	0.00581
平均②	0.00358	0.00514	0.00535	0.00371	0.00517	0.00287	0.00482	0.00409	0.00285

ストップウォッチ改良後

平均①	0.00198	0.00276	0.00236	0.00164	0.00193	0.00240	0.00152	0.00167	0.00172
平均②	0.00206	0.00217	0.00248	0.00206	0.00207	0.00225	0.00222	0.00230	0.00222

【シリコンラバー(1.0mm)】

ストップウォッチ改良前

平均①	0.00328	0.00483	0.00536	0.00432	0.00496	0.00441	0.00461	0.00467	0.00387
平均②	0.00418	0.00433	0.00616	0.00538	0.00328	0.00558	0.00452	0.00462	0.00439

ストップウォッチ改良後

平均①	0.00261	0.00175	0.00357	0.00251	0.00249	0.00218	0.00267	0.00264	0.00180
平均②	0.00191	0.00227	0.00279	0.00287	0.00200	0.00205	0.00267	0.00266	0.00248

【薄いウレタンラバー(1.1mm)】

ストップウォッチ改良前

平均①	0.00628	0.00622	0.00511	0.00437	0.00461	0.00426	0.00369	0.00351	0.00492
平均②	0.00405	0.00367	0.00519	0.00507	0.00403	0.00628	0.00444	0.00530	0.00512

ストップウォッチ改良後

平均①	0.00245	0.00267	0.00389	0.00193	0.00299	0.00203	0.00219	0.00120	0.00250
平均②	0.00249	0.00285	0.00416	0.00218	0.00354	0.00305	0.00203	0.00341	0.00254

【厚いウレタンラバー(2.1mm)】

ストップウォッチ改良前

平均①	0.00514	0.00634	0.00527	0.00606	0.00418	0.00546	0.00412	0.00539	0.00570
平均②	0.00504	0.00544	0.00584	0.00621	0.00472	0.00447	0.00368	0.00556	0.00426

ストップウォッチ改良後

平均①	0.00347	0.00377	0.00355	0.00318	0.00269	0.00267	0.00207	0.00355	0.00340
平均②	0.00296	0.00367	0.00343	0.00249	0.00353	0.00326	0.00218	0.00390	0.00373

表8 平均二乗誤差

	ベニヤ合板	プラスチック板	トレーシングペーパー	シリコンラバー	薄いウレタンラバー	厚いウレタンラバー
平均①	0.01091	0.00994	0.00792	0.01071	0.01071	0.01072
平均②	0.01025	0.01100	0.00747	0.01023	0.01186	0.01077

平均値の平均二乗誤差

	ベニヤ合板	プラスチック板	トレーシングペーパー	シリコンラバー	薄いウレタンラバー	厚いウレタンラバー
平均①	0.00244	0.00222	0.00177	0.00240	0.00240	0.00240
平均②	0.00229	0.00246	0.00167	0.00229	0.00265	0.00241

表6より、ストップウォッチを改良したことで個々の測定値の信頼度を表す平均二乗誤差では $\pm 0.014 \sim \pm 0.028$ の間だった測定時間の誤差の範囲が $\pm 0.007 \sim \pm 0.018$ と2倍近く精度が上がったことがわかる。また、表7の全体の平均値の信頼度を表す平均値の平均二乗誤差では $\pm 0.0028 \sim \pm 0.0630$ の間だった測定時間の誤差の範囲が $\pm 0.0014 \sim \pm 0.0390$ とこれもかなり精度が上がった。表8からは、各シート間でシートの違いによる測定の違いによる差はさほど無くほぼ同じ条件で実験が行われていることがわかる。

5. まとめ

今回の実験では、斜面を転がる円柱あるいは球を題材にした教材のひとつで重力加速度を求める教材について、測定精度があまりよくない原因について考え、少しでも改善することで実験の精度を上げることを試みた。しかし、時間計測については多少精度が上がったものの、斜面の材質を変えて調べたその影響については、あまり大きな違いは見いだせなかったし、結果として測定精度を飛躍的に向上させることはできなかった。

このことは、今回取り組んだ点以外にも「精度を下げる」原因があるためと考えられる。そのうちのひとつに、やはり正しい高さあるいは水平面を確保することが非常に大切であることがあげられる。つまり、円柱での実験のときは実験台の左右の傾きを補正することだけ考えるのが普通であるが、球での実験で球が斜面を斜めに転がり落ちる場合もあることから、実験台の傾きは左右だけでなく、前後の傾きも関係しているということである。

2つ目は回転体と斜面の滑り具合がやはり重要である。この問題の運動方程式には慣性モーメントが含まれていて、滑らずに転がることを前提にしているため、少しでも滑りが入るとそれだけ誤差として精度を下げるように働く。

もっと「正確な実験」にするためには、今回至らなかった点にも焦点を合わせて、さらに改善していく必要がある。一つ一つ改善していくことにより、少しずつ精度が上がり、教材としてももっと使っていくことができるものと思われる。

残された問題として、この実験に関連する教材研究についての文献についても、さらに調査していく必要がある。

(2002年4月30日受理)