

プロジェクト名：斜面を降下する物体の運動を介した物理と体育の合科の試み

研究代表者所属大学・講座・氏名：東京学芸大学・自然系教育講座・荒川悦雄

斜面を滑り下る物体の速さに力学的な重心移動が影響するかについて検証した。具体的には、坂道を漕がずに降下する自転車運転する人の屈伸運動が、速さに及ぼす効果があるかを測定と計算により比較した。

実施場所に求めた条件は、舗装された道で、一定な緩い坂道であること。近隣で、適当な直線距離を確保でき、通行の往来を妨害せず安全なこと、坂道の高低差を測定可能であることも重視した。これらの条件を満たしたのは、多摩湖自転車歩行者道の 9.8^K 地点付近の立体交差の道で、高低差 $h_0 = 2.92 \pm 0.02$ m、斜面上の移動距離 $\ell_0 = 95.4 \pm 0.3$ m の区間で、傾斜角は $\theta = 1.75 \pm 0.02$ 度であった。この坂道にて経過時間の測定と到達速さの測定を実施した。

経過時間の測定では、ストップウォッチによって、静止した状態から一定距離を降下する時間を計測した。被験者は自転車(株式会社あさひ製、PRECISION trekking, FRAME SIZE 480 mm)を漕がずに、自転車での上での屈伸有りの降下と屈伸無し降下に違いがあるかを、基本的に交互に実施し、合計 12 回の計測を行った。ストップウォッチ (SONY 製、スマートフォン Xperia, SO-41A の Google のツールにある時計のアプリ) による計測者は坂道の最下部にて、被験者が合図した時刻から、坂道最下部の取り決めた線を通るまでの経過時間を計測した。被験者は1名で行い、屈伸は 16 回から 20 回程度までを行った。屈伸運動の有無を伴う経過時間の結果は、それぞれ 32.6 ± 1.2 秒と 32.6 ± 3.0 秒となった。結果を図1に示した。この計測法では、静止した状態から安定して動き始めるまでの時間を揃いににくい事が分かった。

到達速さの測定では、モーションキャプチャー (SONY 製、mocopi) を腰や足首等に装着し、位置情報と身体各部の動きを記録しつつ、坂道の最下部にてスピードガン (Sports Radar 製、SRA3000) によって速さを計測した。経過時間の測定と同様に、被験者は自転車を漕がずに、自転車での上での屈伸有りの降下と屈伸無し降下をした。被験者は 2 名で、それぞれ合計 6 回あるいは 7 回の降下を実施し、屈伸の有無の効果調べた。モーションキャプチャーの結果はそこでスマートフォンの映像により確認した。スピードガンによる結果は、約 3 回ずつの平均値として、一方の被験者は、屈伸有り 16.3 ± 0.6 km/h、無し 16.0 ± 0.6 km/h、もう一方の被験者は、有り 15.5 ± 1.0 km/h、無し 16.7 ± 1.0 km/h であった。結果を図2に示した。測定の不確かさを考慮すると、重心移動の効果は、この方式では、検証できていない。

自転車と人との重心が、この坂道に於ける $h = h_0$ から摩擦や抵抗が無い状態で自由落下し、坂道の最下点に到達した時の計算上の速さは 27 km/h となる。実測値は、この値の半分程度なので、粘性抵抗力や慣性抵抗力を考慮した解析が必要となる。これらを踏まえ、運動方程式を

$$m \frac{dv}{dt} = mg \sin \theta - k_1 v - k_2 v^2 + f(t)$$

とした[1, 2]。ここで、 g を重力加速度、 m を質量、 v を速さ、 t を時刻、及び k_1 あるいは k_2 は、それぞれ v に比例する抵抗力あるいは v^2 に比例する抵抗力を特徴づける係数である。また、 ℓ は斜面上の移動距離である。

屈伸による体重移動により、垂直抗力は減少したり増加したりする。よって、屈伸に伴い垂直抗力に比例した摩擦力が変化する。当研究では、屈伸による効果を

$$f(t) = f_0 \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

とした。この効果の最大値を f_0 とし、周期 T で正弦波的に変化すると仮定したのが $f(t)$ である。

測定結果を理解する為、 T を 2.00 秒(≒ 32.6 秒/16 回)とし、 f_0 を $m g \sin \theta$ の 50 % の変化であると仮定して、 t に依存した v や ℓ を数値的に計算した。当研究が対象とする運動は、動き始めてすぐにレイノルズ数が 1 を超えると考えられる[3]。以上より、経過時間と到達速さは、 $k_1 = 0$ とし、 v^2 に比例する抵抗のみを考えて解析した。実験結果とともに計算結果を、図1から図3までに示した。同一人物により得られた測定結果は $k_2 / m = 0.014 \pm 0.002 \text{ m}^{-1}$ により説明できた。測定した速さは終端速度に迫る値であったことも分かった。計算は、屈伸の効果を $f(t)$ と考えた時、 v に影響を及ぼし得る事も示唆している。

以上より、坂道を漕がずに降下する自転車を運転する人の速さを研究対象とする際、諸量の振る舞いや大きさの程度、及び測定に要求される精度を知ることができた。この度、専用の高速カメラ (SONY 製、ILME-FX30B、及び SEL70350G) を導入したので、重心移動を定量的に評価できるようになるだろう。

当該研究を通して、物理科の教員と体育科の教員との交流が連携になった。物理と体育には、本研究のように、共通する興味領域があるので、合科の試みは互助関係を進展させるだろう。

参考文献

- [1] 例えば、原島 鮮、力学 三訂版、第3章、裳華房、1985 年。
- [2] 兵頭俊夫、考える力学、学術図書出版、2021 年。
- [3] 増井 壮太・片岡 佐知子・中村 元彦・常田 琢・松山 豊樹「高校物理における空気抵抗の正しい理解 — 風洞実験、理論解析、落下実験とデータ解析を通して —」奈良教育大学次世代教員養成センター研究紀要、5 号, pp. 37-42, (2019).

- 実験、屈伸有り
- 実験、屈伸無し
- 計算、 $k_2 v^2$ 、屈伸有り
- - 計算、 $k_2 v^2$ 、屈伸無し

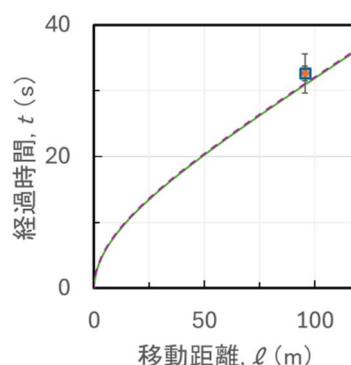


図1 移動距離と経過時間との関係

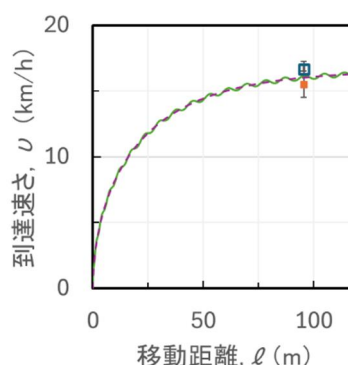


図2 移動距離と到達速さとの関係

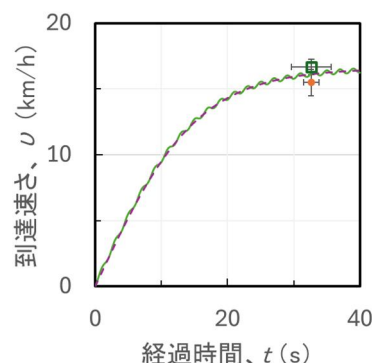


図3 経過時間と到達速さとの関係