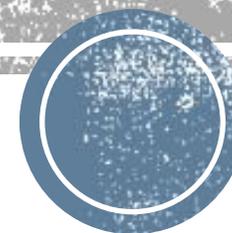


PH019

レール上を転がる球の 摩擦力の研究



研究背景

球体の輸送をするときはレール上を転がす。球を使った輸送は、ベアリングなどレールで支持された球の運動になっている。→レール上を転がる球の効率良い運動に興味があった。

実験方法

力学的エネルギーの減少から摩擦力を求める[2]

力学的エネルギー $E =$ 運動エネルギー + 回転エネルギー

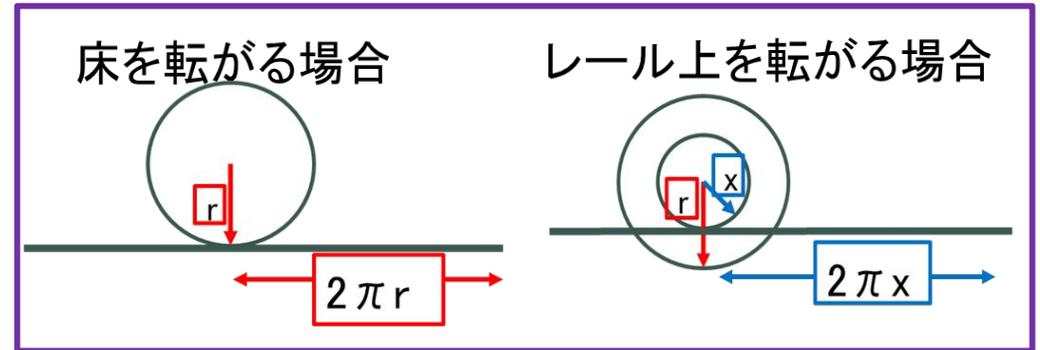
$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 \\
 &= \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{2}{5}mr^2\right)\left(\frac{v}{r}\right)^2 \\
 &= \frac{1}{2}mv^2(1 + 0.4)
 \end{aligned}$$

運動エネルギーと回転半径を補正した回転エネルギー

$$1/2mv_0^2(1+0.4(r/x)^2)$$

$$f = \mu \times mg$$

$$1/2mv_1^2(1+0.4(r/x)^2)$$



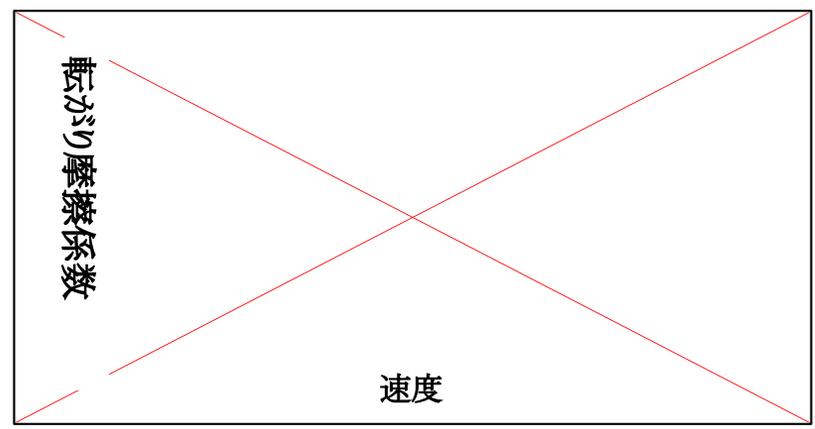
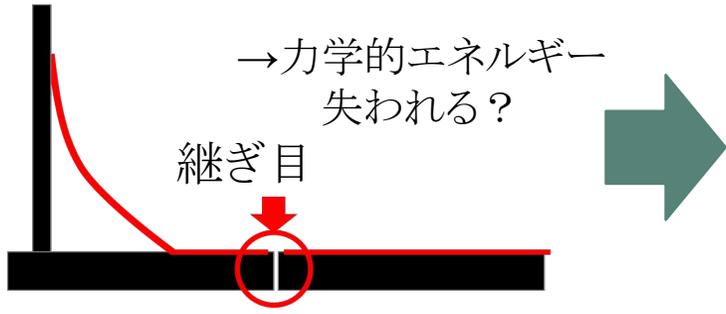
$$\mu = \frac{\text{エネルギーの減少量}}{mg \times L}$$

$\mu = \frac{\eta}{r}$: 滑り摩擦係数
 η : 転がり摩擦係数

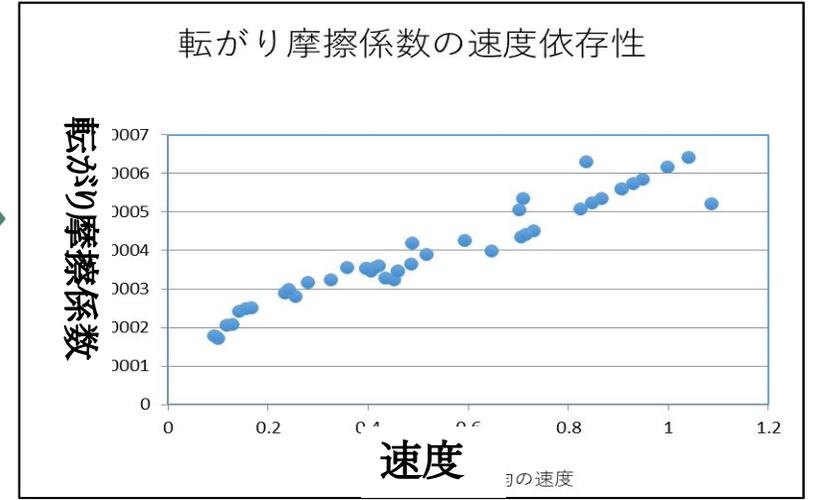
はじまり

教科書：滑り摩擦は速さに依存しない[2]

先輩の実験



自分の実験



継ぎ目のないレール
でも
摩擦は速さに依存した

空気抵抗： $F_d = \frac{1}{2} C_D \rho \pi R^2 v^2 = 7.5 \times 10^{-5} \text{ (N)}$

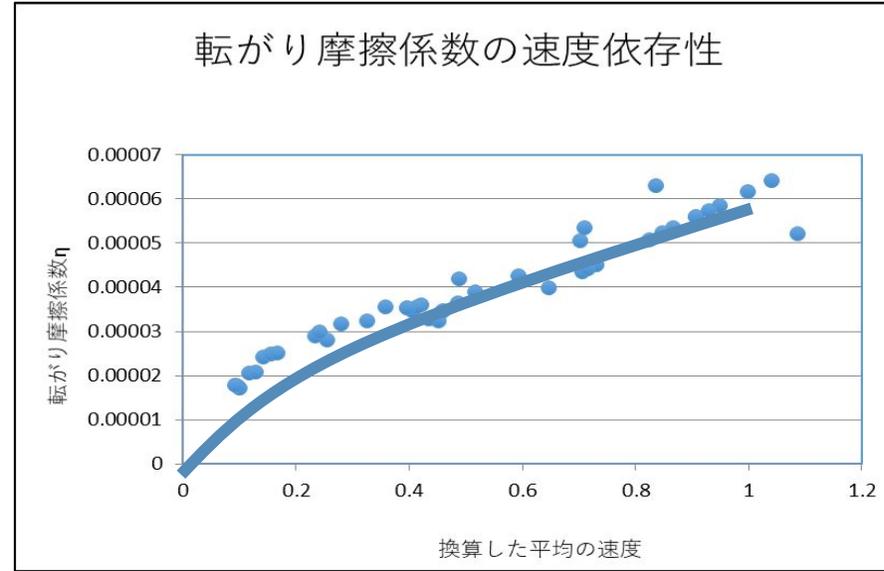
減速力の実験値： $F' = 2 \times 10^{-2} \sim 2 \times 10^{-3} \text{ (N)}$

最大で $\frac{F_d}{F'} = 0.038 \doteq 4\% \dots$ 空気抵抗が主な原因ではない

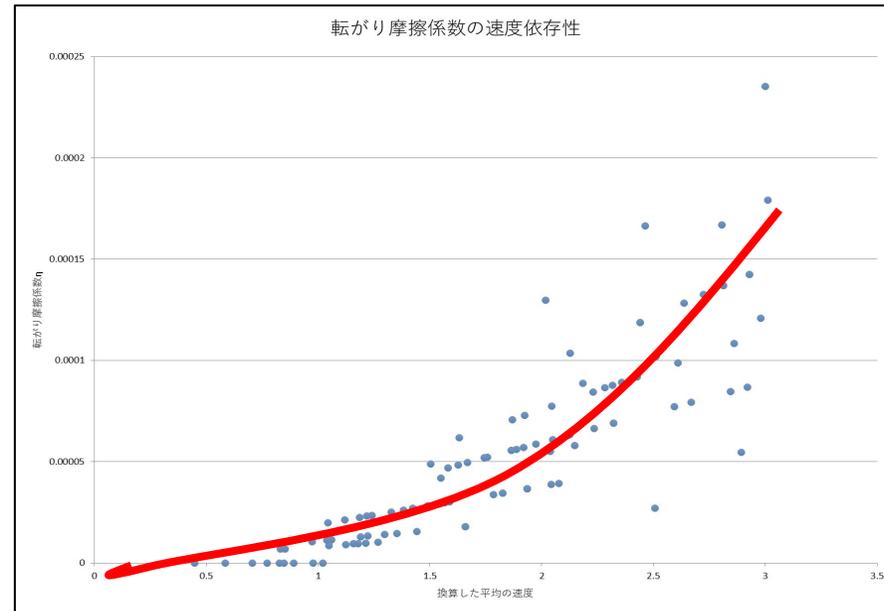
平面上でも転がり摩擦係数は速度に依存するのか



レール



平面



素材の変形が転がり摩擦に関係するので
同じ材質にするためレール裏面を使った

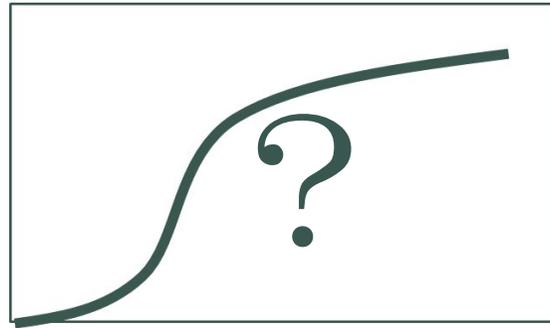
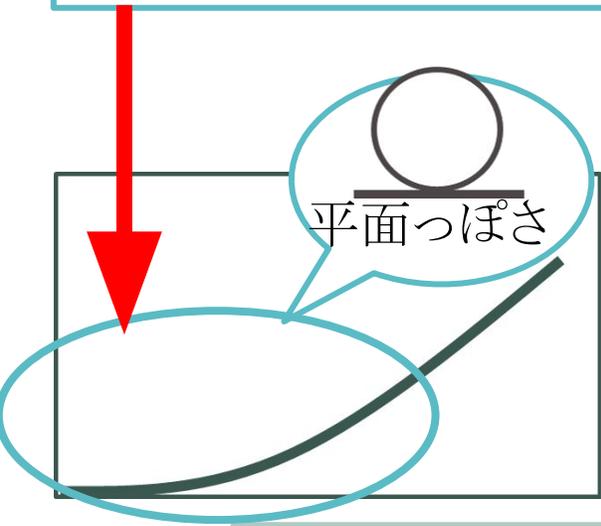
平面上でも
転がり摩擦係数は
速度に依存する

「レール上」と「平面上」
では
増加の傾向が異なる

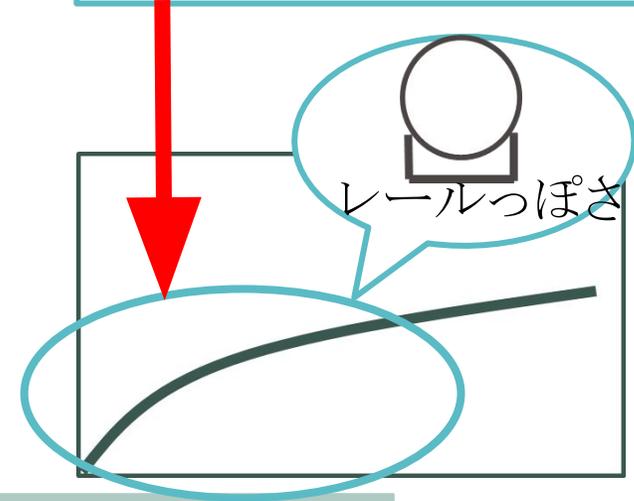
レール上から平面上にかけて摩擦はどのように変化するか？

レールの間隔を変えれば、極端なレール面から平面までの変化が見られる？

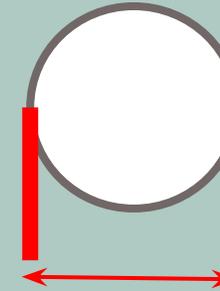
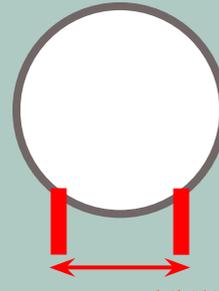
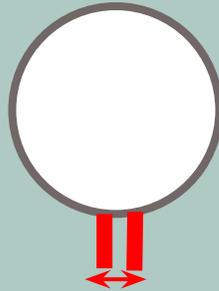
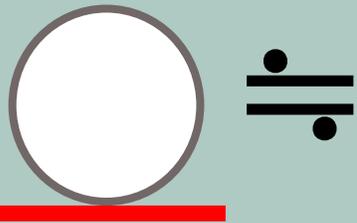
転がり摩擦のみ



転がり摩擦+滑り摩擦..?

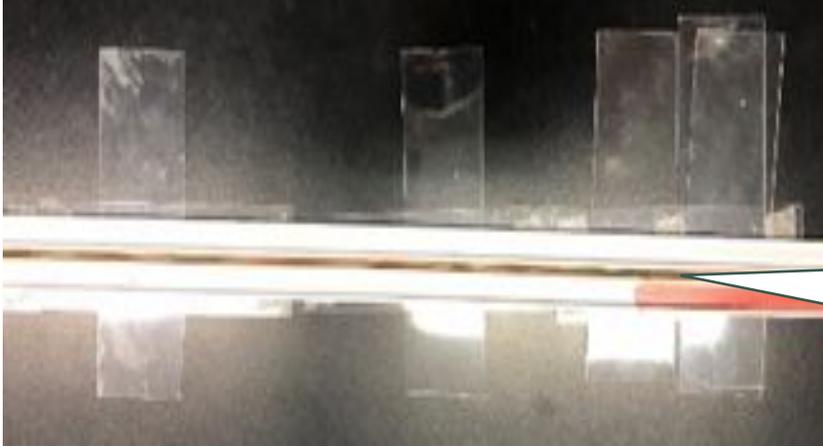


平面



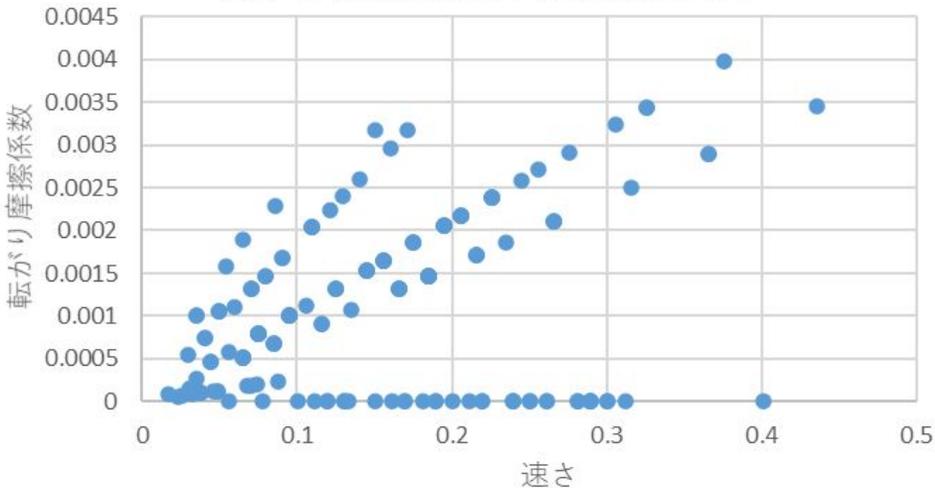
極端なレール面

棒を挟んでレールの間隔を変えた実験



- 棒を挟んでレール2本で間隔を調整
- プラ板を差し込んで平らにした

転がり摩擦係数の速度依存性



◆ 転がり摩擦の値のバラつきが大きすぎ

- 本当に平らなのか？
- レールの間隔は一定なのか？
- 何本もの線上のバラつきは精度不足？

怪しい要素が多すぎて1つ1つ潰していけない

逆にレールの間隔を変えずに球の直径を変える (確実な平坦を作る)



球のサイズを段階的に替える

角パイプ(アルミ製)

レールは貼る

滑り摩擦

$$\mu = \frac{\text{エネルギーの減少量}}{\text{垂直抗力} \times \text{距離}}$$

転がり摩擦

$$\eta = \text{球の半径} \times \mu$$

摩擦係数は材質だけ

で決まるので、

球のサイズによる

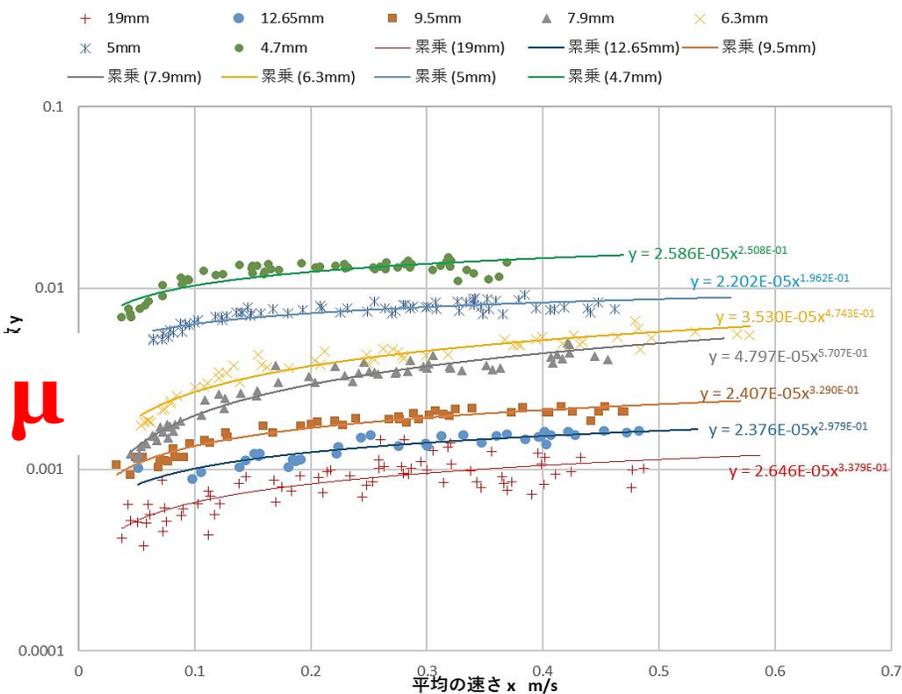
差はないはず

↓ 結論

転がり摩擦

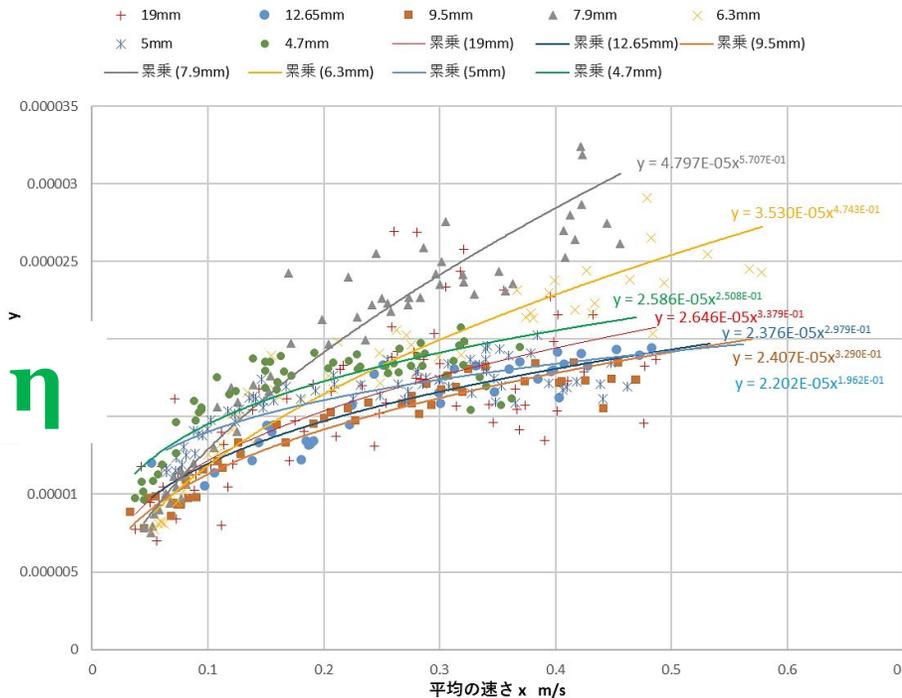
である[3]

様々な半径の球のレール上の滑り摩擦係数の速度依存 d=9mm



球のサイズによって10倍差がある

様々な半径の球のレール上の転がり摩擦係数の速度依存 d=9mm

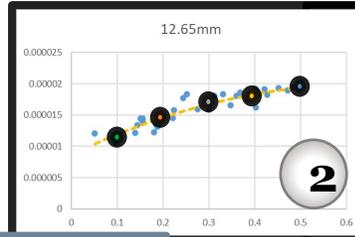


球のサイズによって差が無い

レール上の転がり摩擦から平面上の転がり摩擦への変化を調べる

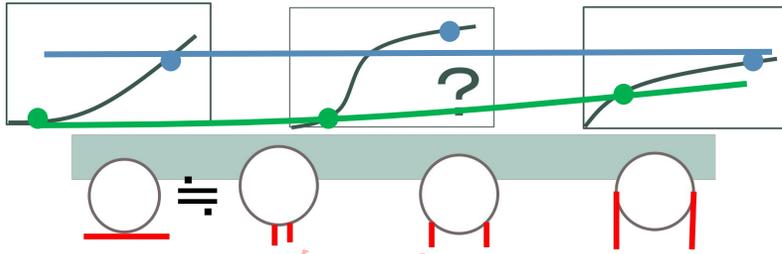
摩擦係数の速度変化

グラフ
の変換



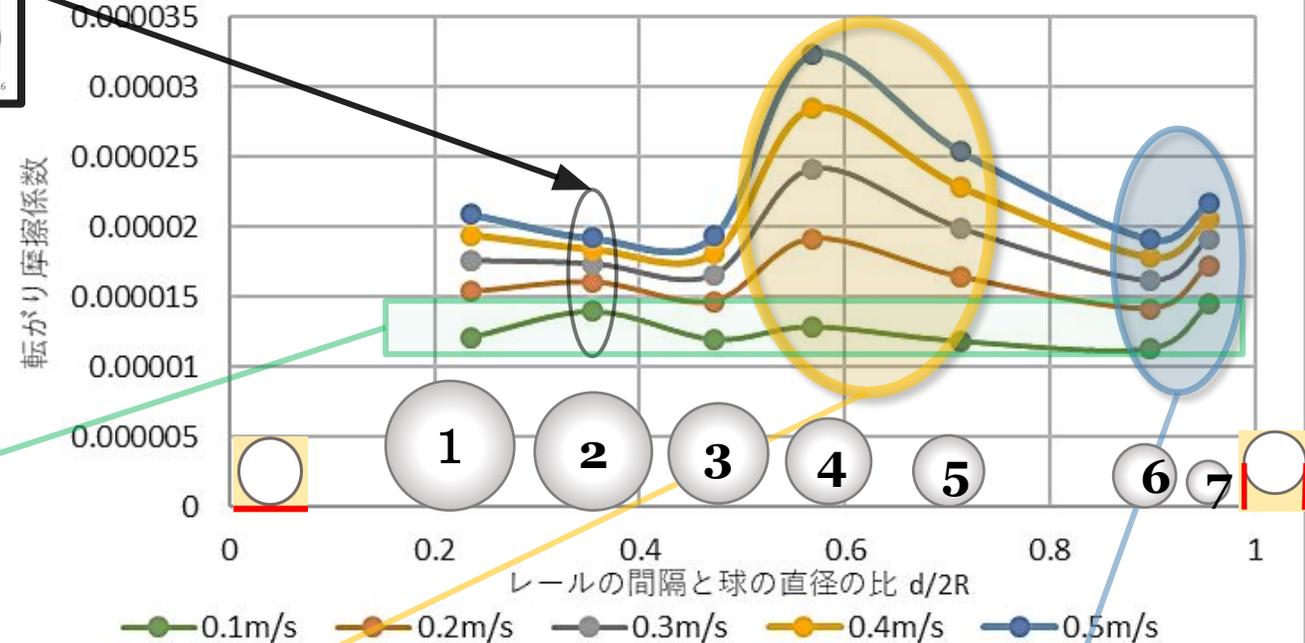
摩擦係数のレール間隔と球直径の比による変化

予想とは

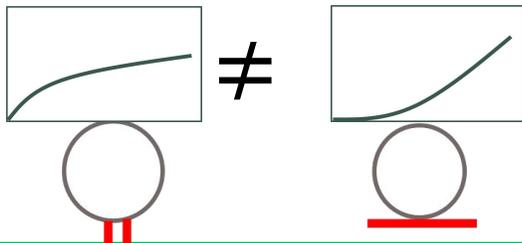


いろいろ違った

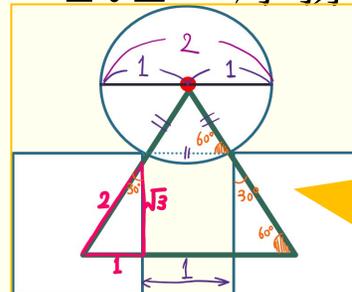
レール間隔と球の直径の比による転がり摩擦係数の変化



- 低速でも摩擦係数は一定
- レールの間隔を狭くしても平面のグラフに近づかない

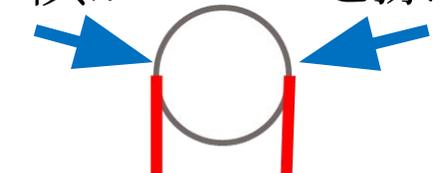


- レール間隔と球の直径の比 1:2 → 摩擦係数増大



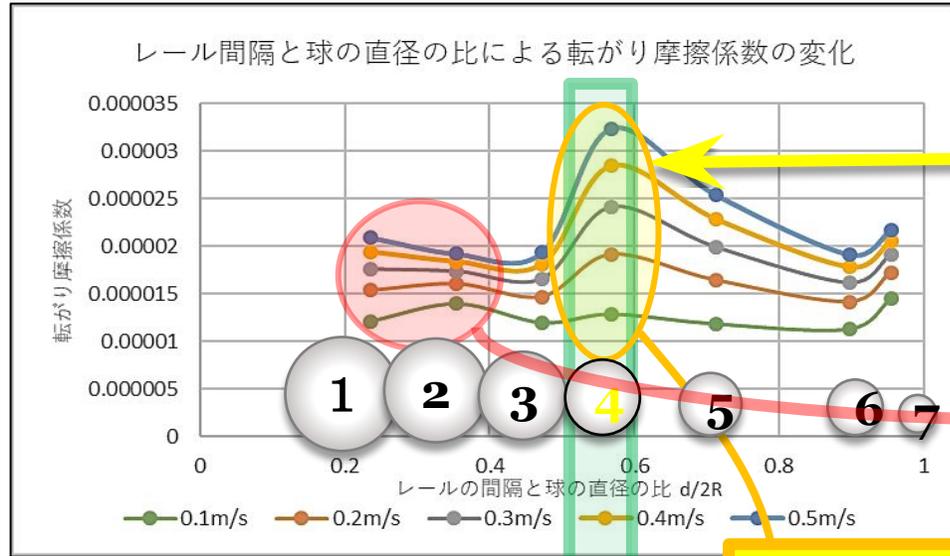
こういう位置関係に何かある？

球の横がレールと擦れる

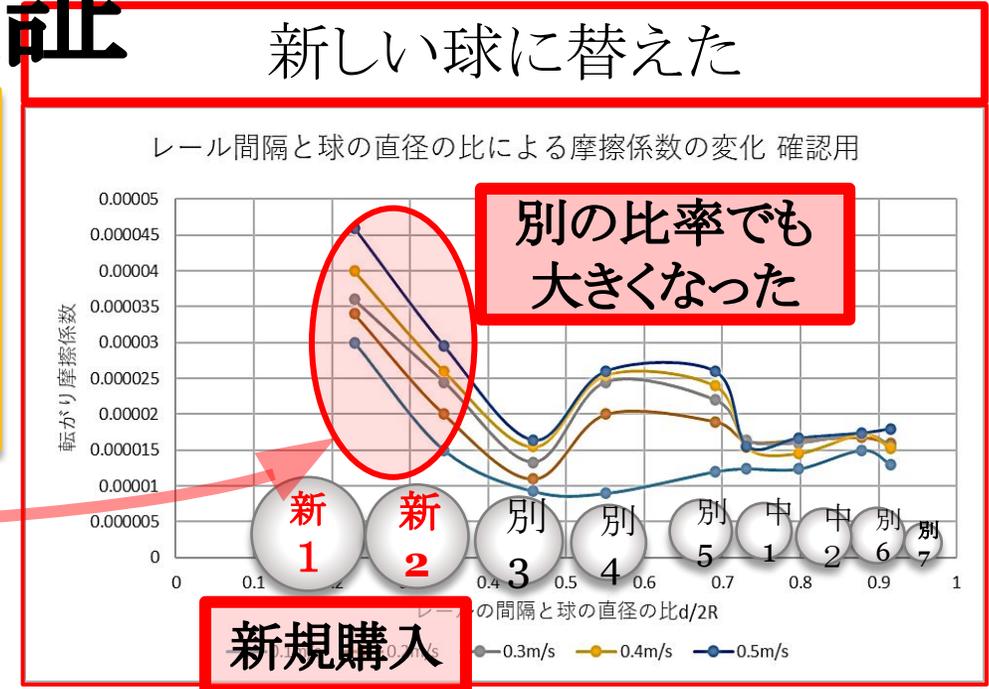


これは滑り摩擦の効果か？

間隔と直径1:2の現象の検証

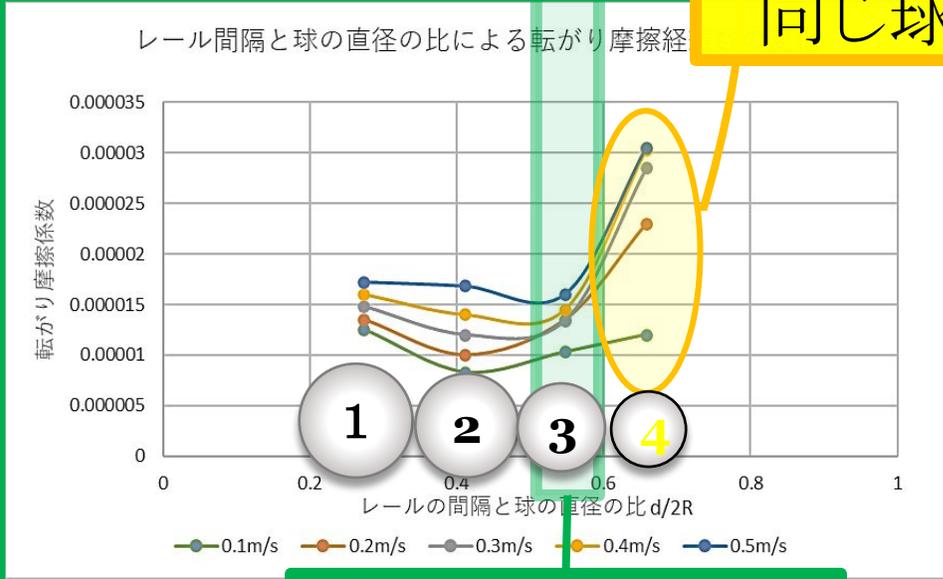


こういう関係に何かある？



同じ球

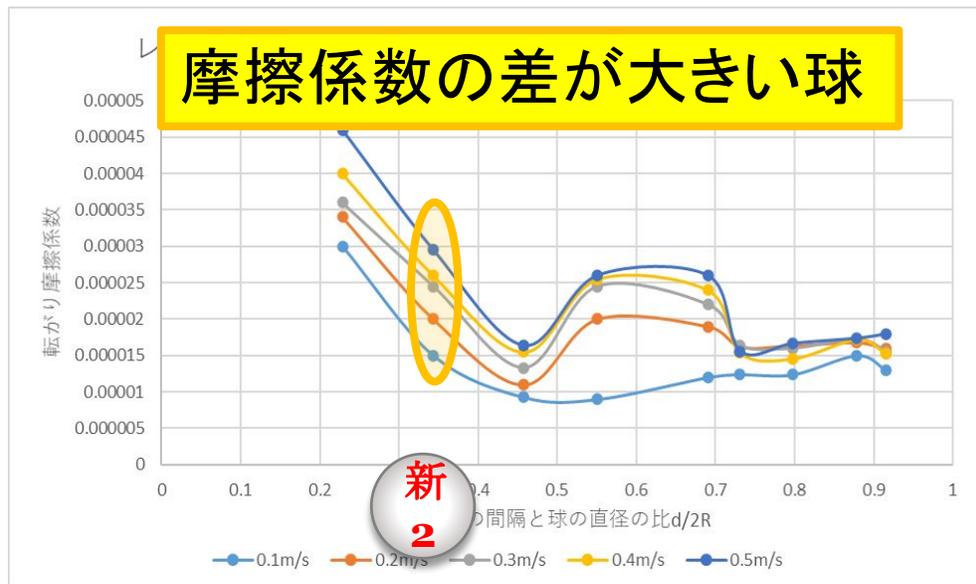
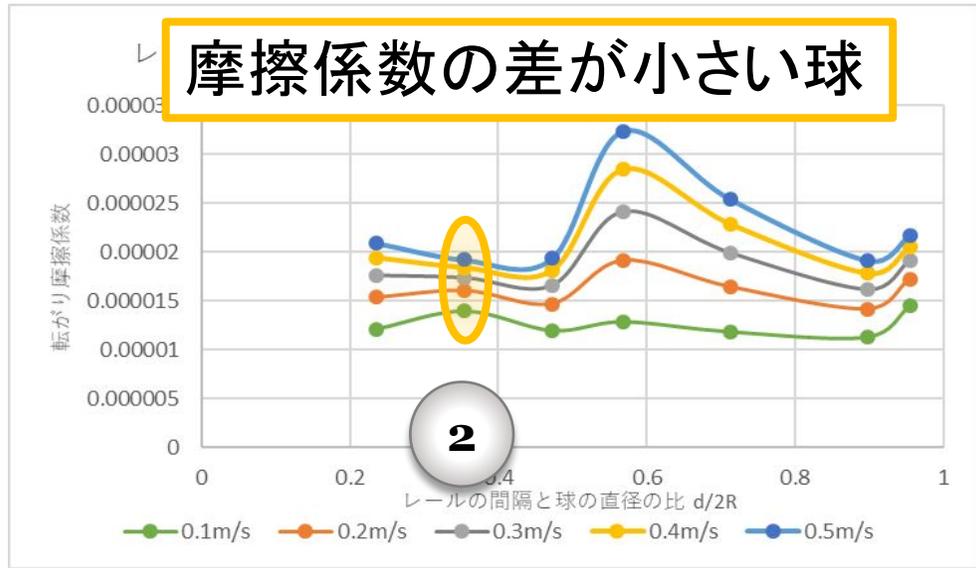
レールの大きさを替えた



1:2でも大きくなる

摩擦係数の速度依存性が大きくなる原因は球の違いにある

球の表面による違い

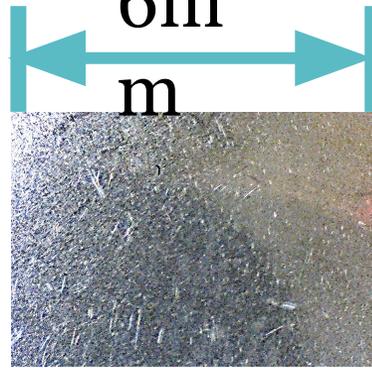


つるつるさ

6m
m



2



大きな傷が多い
ザラザラ

表面の傷の具合を
顕微鏡で比較

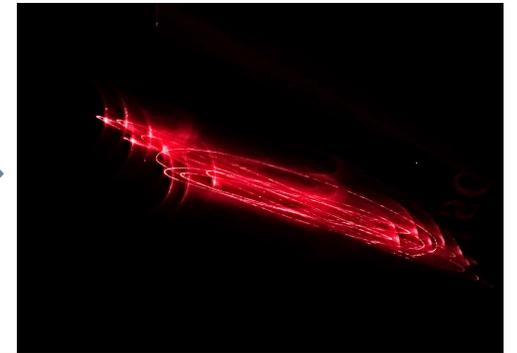


新
2

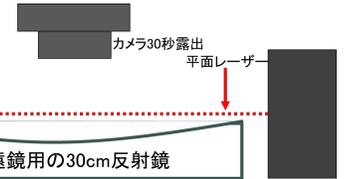


大きな傷が少ない
ツルツル

真球度



きれいな往復運動
真ん丸

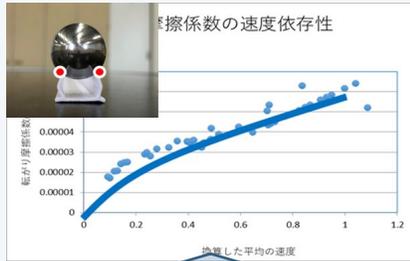


急に向きが変わる
デコボコ

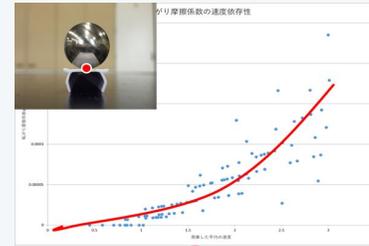
9

この転がり摩擦には2つの別な原因がある？

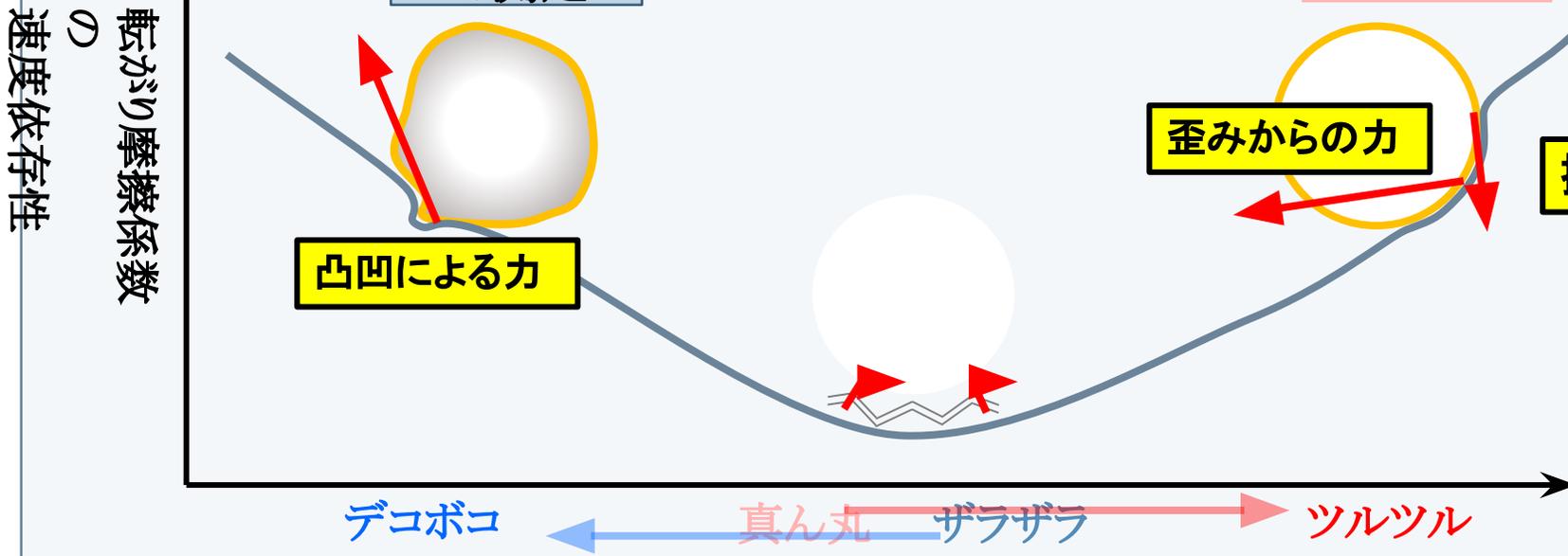
『レールの裏(平面)のときは、横に逸れたデータは記録されてないですね。レールの時はそういう摩擦も記録されていますよね。その違いではないですか？』



レール上で測定



平面上で測定



2019年
日本物理学会 Jr.
セッションで指摘され
ていた課題

物理学者
恐るべき
洞察力

昨日の専門の先生方から前頁の実験結果の解釈に繰り返し同じご指摘を受け、矛盾すると思えた結果が、2年前の物理学会 Jr セッションでの宿題を解く鍵かもと仮説が閃いた

結論

- プラスチック製のレーン上を転がる球の摩擦は、転がり摩擦であり滑り摩擦ではない。ただし球の直径がレーン間隔に近いときは滑り摩擦が効いてくる。
- 転がり摩擦係数は、球の直径とレーン間隔の比とは関係ない。
- 転がり摩擦係数の速度依存性は、真球度の悪さや表面のつるつるさに関係して大きくなる。

展望

- 真球度の測定は大変難しいようだ[4]。そこで、レーン上を転がる球の転がり摩擦係数の速度依存性を測定することで、球の真球度が測定できるかもしれない。今後デジタルマイクロメーターで真球度を測定するなど比較検証していきたい。

参考文献

- [1]天野大輔、平野悠介、辻子観月、樋山恵子 玉川学園高等部3年「力学的エネルギー実験装置の転がり摩擦の研究」2018.3関東近県SSH 校合同発表会ポスター発表
- [2] 改訂版新編物理基礎 数研出版
- [3]浅倉ゆい「球の転がり摩擦力と速度の関係」第15回日本物理学会 Jr. セッション(2019)
- [4]柴田順二 「球体のはなし」 Journal of the Japan Society for Abrasive Technology Vol.56 No.1 2012 JAN. 50-51

実験器具、材料

- ステンレス球 (SUS304)

佐藤鉄工製 直径1.5inch=3.81cm(1個入り), 1inch=2.54cm(2個入り), $\frac{3}{4}$ inch=1.905cm(5個入り), $\frac{5}{8}$ inch=1.5875cm(10個入り), $\frac{1}{2}$ inch=1.27cm(30個入り), $\frac{3}{8}$ inch=0.9525cm(50個入り)
アズワン製 直径1cm(230個入り) 中国製

- レール

オーム電機製 モール0号, 1号, 2号長さ2m、0号と1, 2号は形状が違う(オーム電機のHP参照)
内径幅0号(9.0mm), 1号(11.9mm), 2号(16.5mm)

- **ピースピV (簡易速度計測器)**

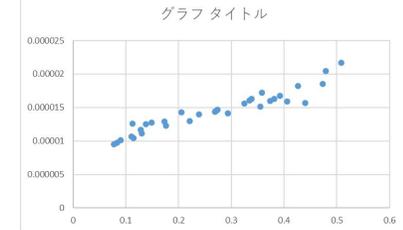
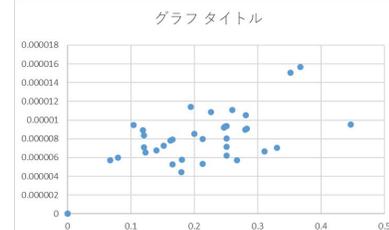
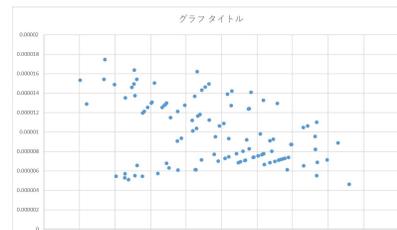
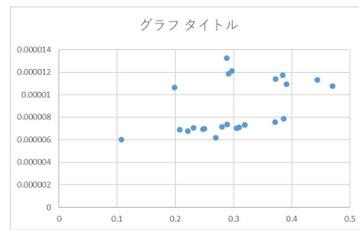
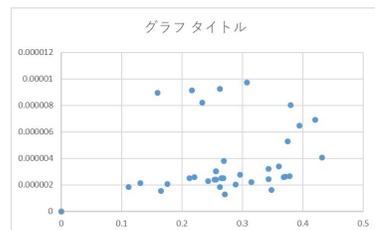
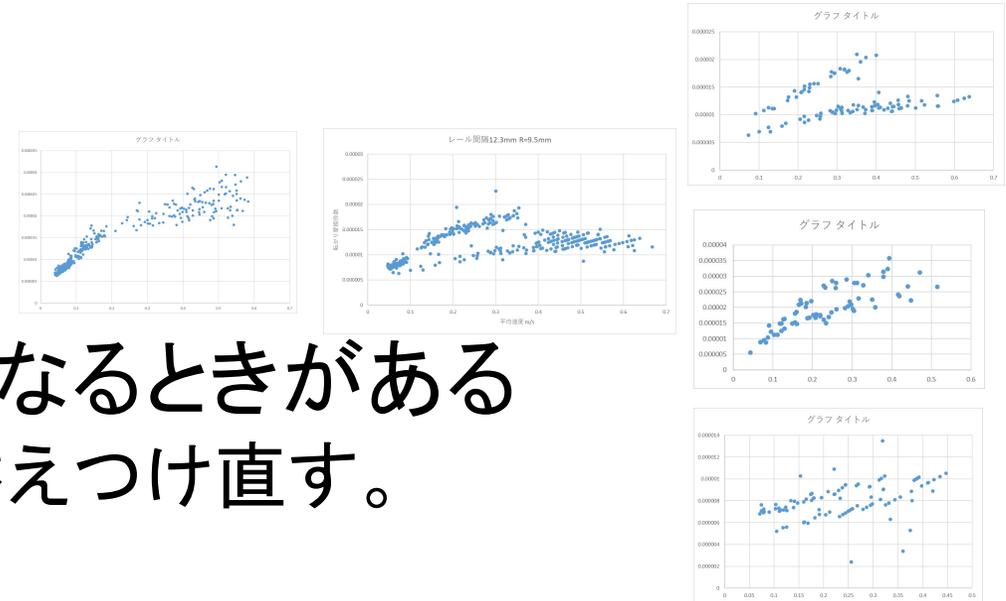


現在の実験方法の問題点とその対応法

工夫しないとグラフのばらつきが大きい

- 実験途中に急にグラフが2重になるときがある
→ レールの浮き上がりが原因。押さえつけ直す。

- はじめからグラフのばらつきが大きい
→ 水平度が悪いのが原因の一つ。左右から同じ初速度で入れて同じ終速度になるように斜度を調整する。

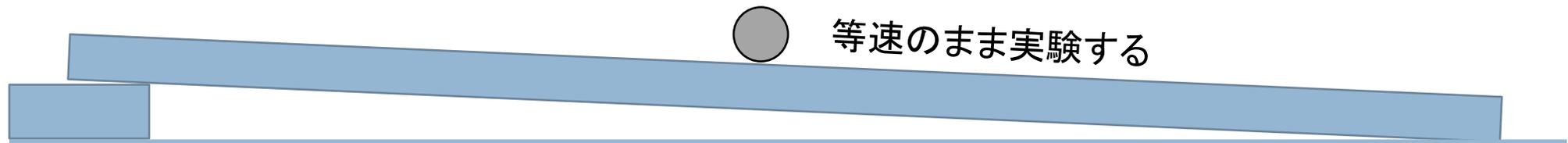


これまでに行ったその他の工夫

速度が減少する実験の欠点：低速域では停止するため限度がある。

改良：

運動エネルギーの減少でなく、位置エネルギーの減少から測定する



欠点：

水平を精度良く測る方法がないので、傾きも精度良く測れない。



放物面で球が静止するまでの 時間の比較

