

混合した衝突球の隙間と 振る舞いの変化の研究



背景

先輩たちの研究から、3球以上の衝突球では1つの金属球をスーパーボール(同じ質量,半径,反発係数)に取り替えると、たまに通常では起きない現象が起きることがわかっていた[1]。



通常では起きない現象

(金属球)→(金属球)(スーパーボール) (スーパーボール)→(金属球)(金属球)

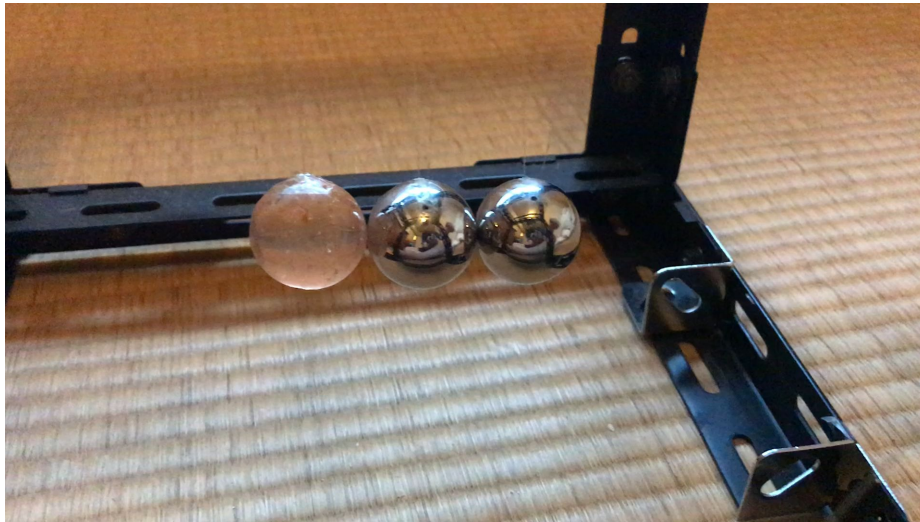


図1 通常の現象



図2 通常では起きない現象

* スーパーボールは金属球と同じ質量 m ,半径 r ,反発係数 e
* 金属球は中空のステンレス球



異常な現象はこの組み合わせだけ

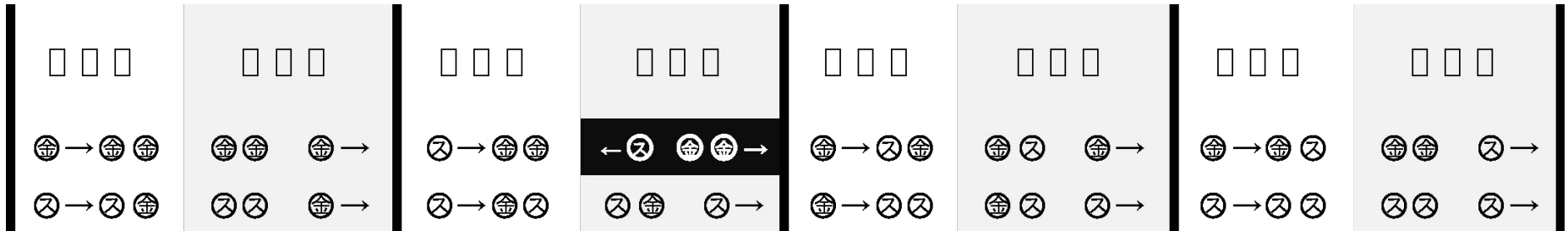


図3 様々な組み合わせの実験結果

2つの金属球が接触していたところにスーパーボールを衝突させた時だけ、2つの金属球がくっついたまま飛び出た[2]。

今回の研究

通常起きない現象は
どんな条件の時に起きるのか

仮説

金属球同士の間隙の大きさが
異常な現象が起きる条件になる
のではないかと



研究の方法

金属アングルで頑丈に作られたフレームに、テグスでステンレス製の球やスーパーボールを取り付ける。球同士の間隔を隙間ゲージで0.1mm単位で調整できるようにアクリル板でテグスを押さえるようにした。

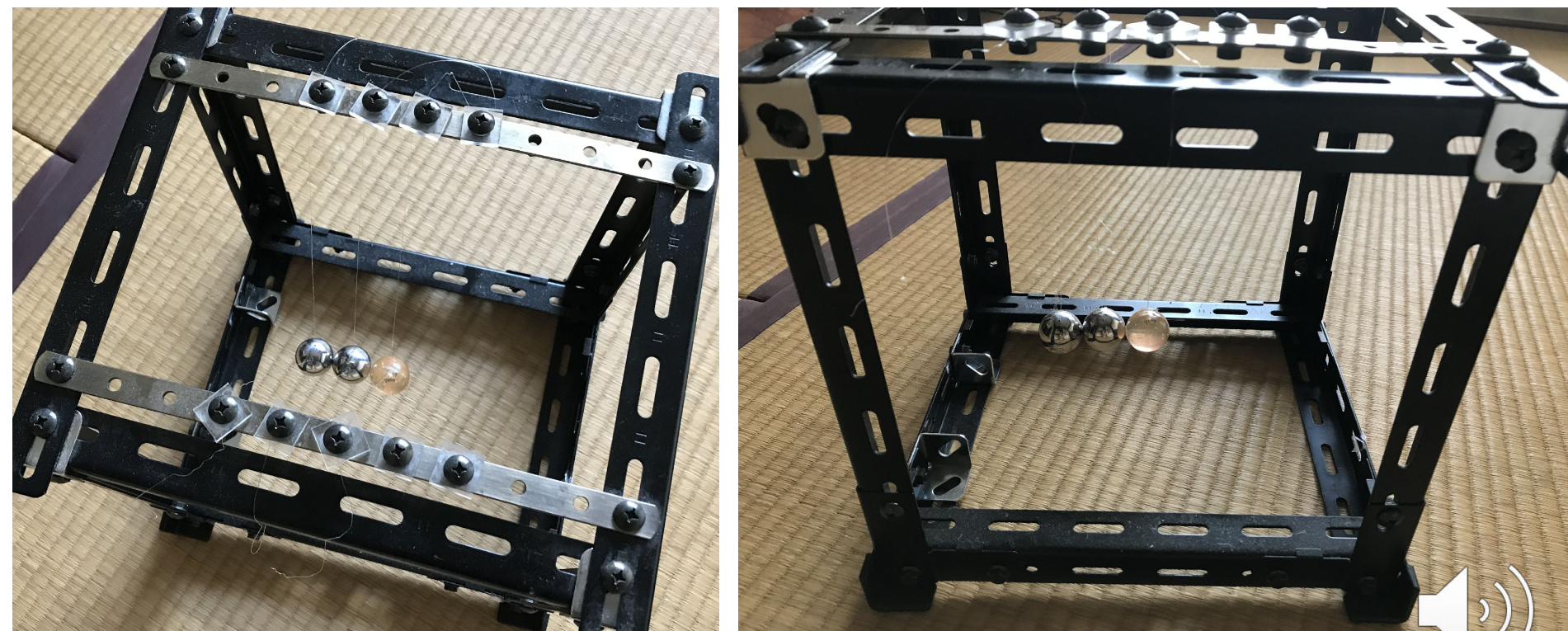


図4 実験装置

球同士の衝突の様子をiPhoneのスローモーション(720p/240fps)を使って撮影して速さを求めた。

実験装置の上にiPhoneを取り付けて、下に白い紙とハロゲンライトを設置してシャッタースピードを速くしてブレを無くした。

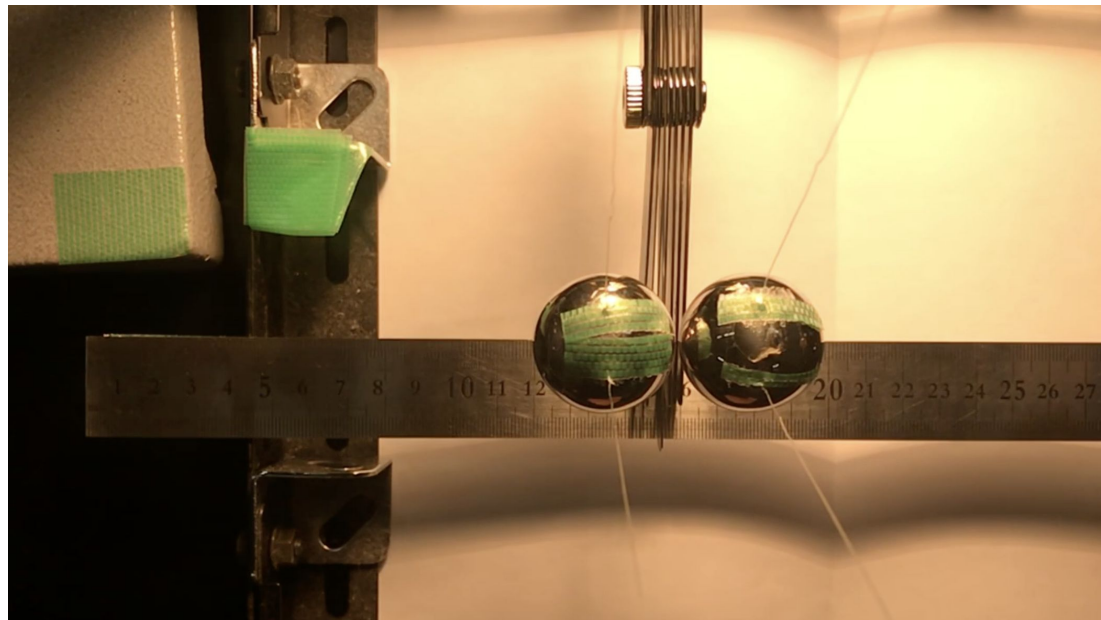


図5 隙間ゲージによる金属球の隙間の設定



結果

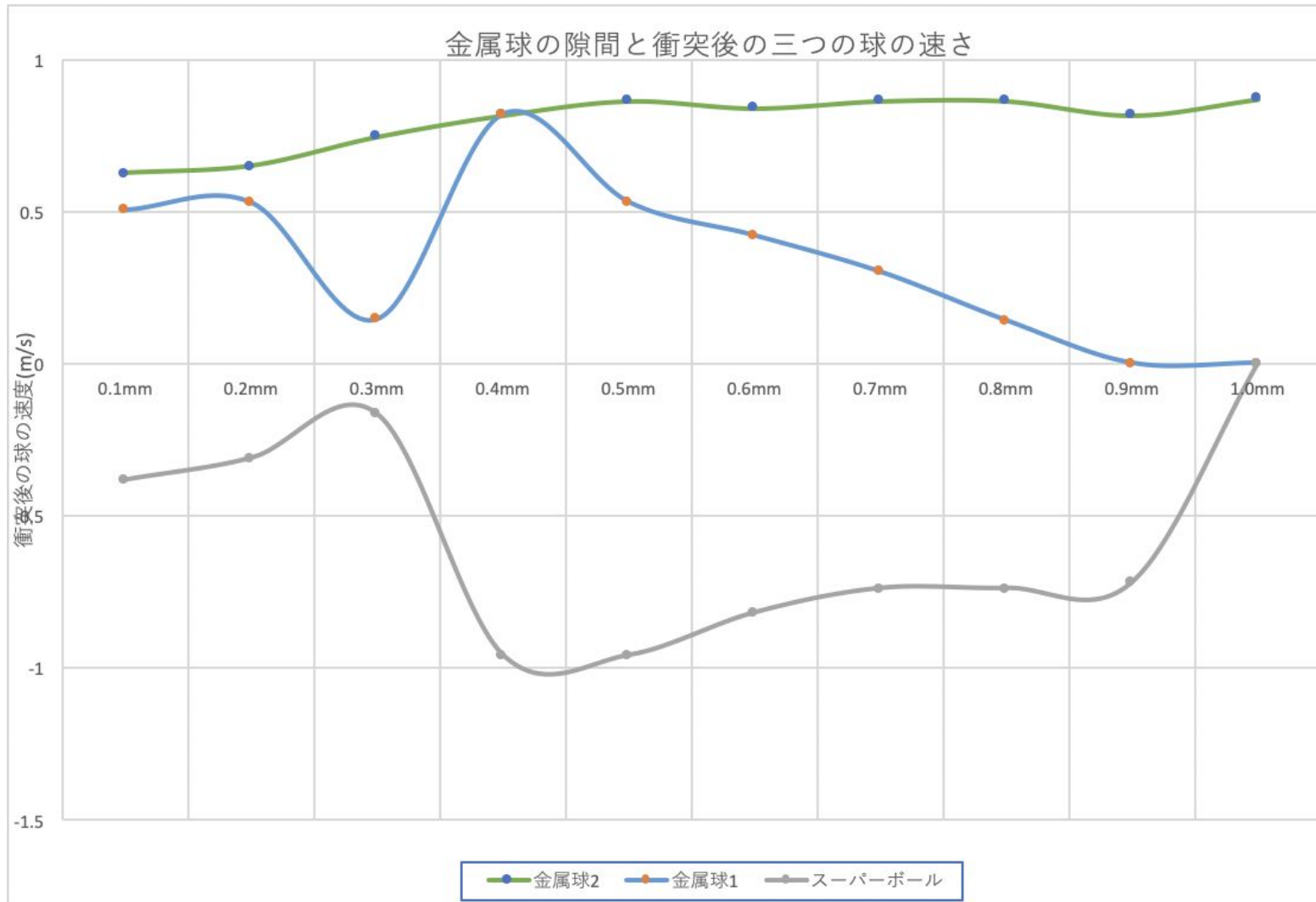


図6 金属球の隙間と衝突後の3球の速さ



考察

昨年の実験(スーパーボールの初速度 0.7m/s 、スーパーボールと金属球の衝突時間 $2.5\sim 3.0\text{ms}$ 、金属球同士の衝突時間 0.13ms)よりスーパーボールと金属球は加速度 $a=260\text{m/s}^2$ の等加速度直線運動と近似する。金属球同士の衝突は瞬間的な弾性衝突で速度が入れ替わる。として理論計算した。

理論計算例 隙間が 0.1mm のとき

スーパーボールは 0.7m/s で金属球1に衝突してくる(図7)。

金属球1が押され 0.1mm 動いて金属球2に衝突する。

$$0.0001\text{m} = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2} \times 260\text{m/s}^2 \times t^2 \quad t = \sqrt{\frac{0.0002}{260}} = 0.00088\text{s}$$

金属球1の速さは $v_1 = at = 260\text{m/s}^2 \times 0.00088\text{s} = 0.228\text{m/s}$ 、

スーパーボールの速さは $v_{\text{ス}} = 0.7\text{m/s} - at = 0.472\text{m/s}$ 。

スーパーボールが金属球1に衝突したまま、

金属球1と金属球2が衝突をして速度は入れ替わり

金属球2が飛び出て金属球1が止まる(図8)。

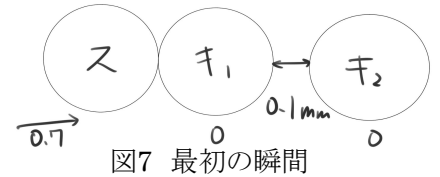


図7 最初の瞬間

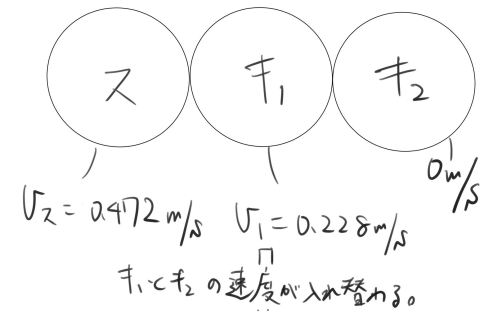


図8 金属球1が2に追いつき速度が入替る

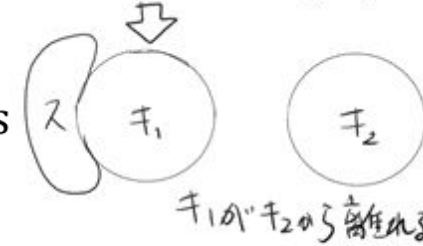
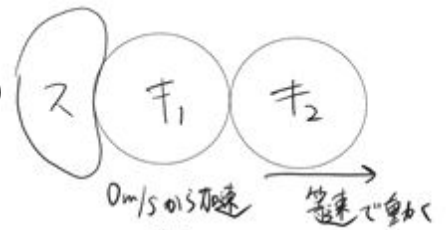
スーパーボールに押されて速度0の金属球1が速度0.228m/sの金属球2に再び衝突する(図9)時間は、

$$\frac{1}{2}at^2 = 0.228\text{m/s} \times t, \quad t=0.00175\text{s}.$$

金属球1の速さは $v_1=at=260\text{m/s}^2 \times 0.000175\text{s}=0.455\text{m/s}$ 、

スーパーボールは $v_s=0.7\text{m/s} - 0.455\text{m/s} - 0.228\text{m/s}=0.017\text{m/s}$

再び金属球同士の速さが入替り $v_1=0.228\text{m/s}, v_2=0.455\text{m/s}$



このときスーパーボールの弾性エネルギーは
力学的エネルギー保存からまだあることがわかる。

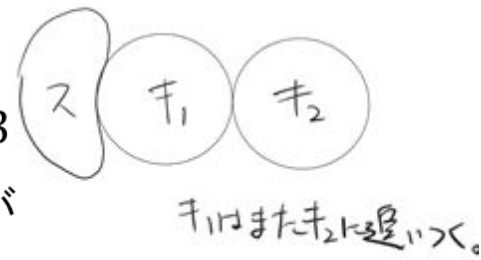
$$\frac{2}{m}U=(0.7\text{m/s})^2 - (0.228\text{m/s})^2 - (0.455\text{m/s})^2 - (0.017\text{m/s})^2=0.23$$

$v_s=0.017\text{m/s}, v_1=0.228\text{m/s}, \frac{2}{m}U=0.23$ からスーパーボールが

金属球1と離れる時は運動量保存と力学的エネルギー保存より 図9 金属球1が2に再び追いつく

$$0.017\text{m/s} + 0.228\text{m/s} = v_s + v_1, \quad (0.017\text{m/s})^2 + (0.228\text{m/s})^2 + 0.23 = v_s^2 + v_1^2$$

連立として解くと、 $v_s=-0.233\text{m/s}, v_1=0.478\text{m/s}$ となるので、金属球1は三度目の金属球2との衝突を起こして速さが入れ替わり $v_1=0.455\text{m/s}, v_2=0.478\text{m/s}$ となる。

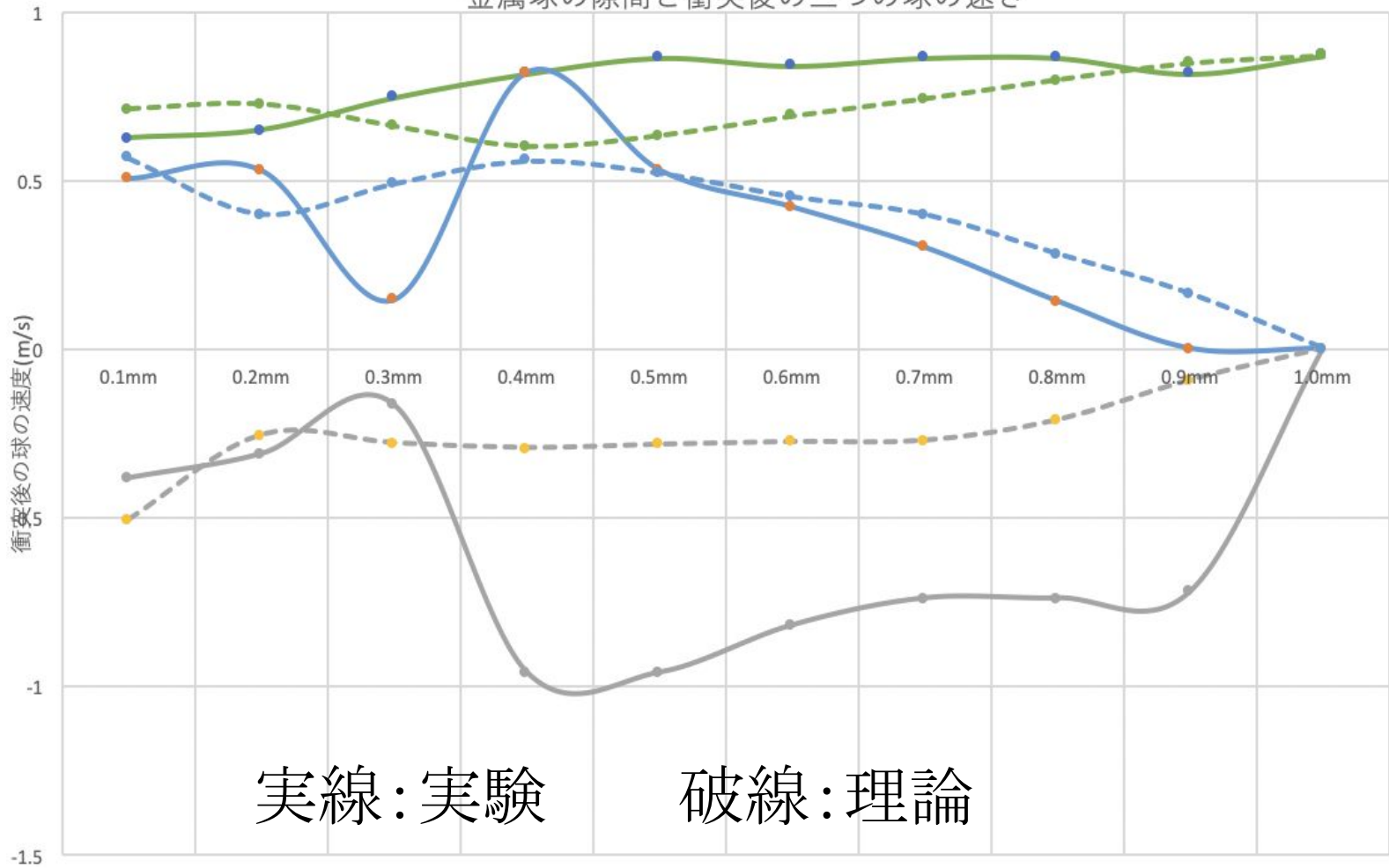


したがって、隙間が0.1mmの時は金属球1と2は3回衝突して最終的に
スーパーボール... -0.230m/s 、金属球1... 0.455m/s 、金属球2... 0.478m/s になる。

隙間が0.2mm~0.9mmの時も同様に計算した。



金属球の隙間と衝突後の三つの球の速さ



- 隙間が0.0mm～0.1mmは金属球同士が3回以上衝突
- 隙間が0.2mm～0.4mmは金属球同士が2回衝突
- 隙間が0.5mm～0.9mmは金属球同士が1回衝突



結論

衝突後の3球の速さを実験と理論で調べた結果、金属球の隙間がある値を超えるか否かで、通常の現象が起きるか、2つくっついて出る特異な現象が起きるかが分かれることが検証できた。

したがって仮説が正しかったことがわかった。

謝辞:

実験をする際、理論を考える際、また昨年度のポスターセッションでアドバイスをしてくださった 様々な先生方に感謝いたします。

参考文献:

[1] 飯尾一斗 玉川学園高等部「衝突球の原理の研究」第15回日本物理学会Jr.セッション(2019)

[2] 井田脩介 玉川学園高等部「混合した衝突球の隙間による時間の変化」第16回日本物理学会Jr.セッション(2020)