

物理シミュレーションを用いて

ボウリングでストライクになる条件を調べる

兵庫県立神戸高等学校 総合理学科 2年

佐伯凌央 宮寄匠平 八幡祥太郎 横山享汰 李定樹

ボウリングのプロボウラーは右利きの選手の場合、ボールをレーンの右側に沿うように投げ、そこから左に曲げ1ピンのやや右側に当て、ストライクを取る方法が主流である。その他にもボウリングにはさまざまなストライク理論があるが、それらは経験論であり実証されたものがなかった。そこで、この実験ではunityという物理シミュレーションソフトを用いてストライクになる条件を求めた。また同時にunityのシミュレーションの実証性を確かめる実証実験を行った。

1.はじめに

1.1 研究の動機

ボウリングは十本のピンをめがけてボールを投げ、倒したピンの本数を競うスポーツである。ボウリングのプロボウラーは右利きの選手の場合、ストライクを取るためにボールをレーンの右側に沿うように投げ、そこから左に曲げ、1ピンのやや右側に当てる方法が主流である。その他にもボウリングにはさまざまなストライク理論があるが、それらは経験論であり実証されたものがなかった。そこで、初期位置と入射角のパラメータを変えていきストライクになる条件を求めたことにした。

1.2 研究の目的

まず物理シミュレーションソフトunityを用いて実際のボウリングのレーン、球、ピンを再現し、初期位置と入射角がどのような値になればストライクが起りやすいか調べる。またunityでの実験の実証性を確かめるため、実際にボールを転がして実証実験を行い、同じ初期位置、入射角、初速度でunityのシミュレーションを行う。その結果を比較し、実証性を確かめる。

2.予備実験（パラメータの測定）

unityの実験で反発係数の値が必要であるので測定した。

2.1 ピンとピンの反発係数の測定

図1①のように、2本のピンを同じ高さにそろえてつるし、底を基準とする。一方のピンを基準の高さから高さ h まで上げてはなし、2本のピンを衝突させる。はじめに上げたピンをピンA、もう一方のピンをピンBとする。AがBと衝突した後高さがほとんどなかったため、衝突後のAの高さは0とみなす。Bの衝突後の高さを h' とする。

高さ h のAの衝突直前の速さ v は、力学的エネルギー保存則 $mgh = \frac{1}{2}mv^2$ より、 $v = \sqrt{2gh}$ となる。同様にするとBの衝突後の速さは、

$$v' = \sqrt{2gh'}$$

よって反発係数 $e = \frac{\sqrt{2gh'}}{\sqrt{2gh}} = \frac{h'}{h}$ と計算できる。

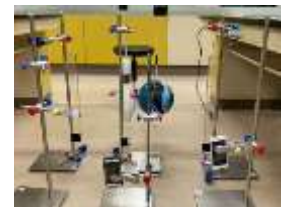


図1①;反発係数の測定装置 図1②;反発係数の測定

結果は表1のようになった

表1;ピンとピンの反発係数の測定

		回数				
高さ	h	0.080	0.074	0.090	0.080	0.070
	h'	0.050	0.050	0.050	0.040	0.038
e		0.79	0.82	0.75	0.71	0.74

この5回の測定値の平均をとって、ピンとピンの反発係数を0.76とした。

2.2 ボールとピンの反発係数

図1②のようにピンの場合と同じように行う。ボールの初めの高さを h 、衝突後のボールの高さを h' 、衝突後のピンの高さを h'' とする。ピンとピンの場合と同じように計算すると、

反発係数 $e = \frac{\sqrt{h'}}{\sqrt{h}} - \frac{\sqrt{h''}}{\sqrt{h}}$ で求まる。

結果は表 2 のようになった。

表 2 ; ボールとピンの反発係数

		回 数							
		1	2	3	4	5	6	7	8
高 さ 低	h	0.081	0.076	0.083	0.082	0.088	0.088	0.067	0.085
	h'	0.127	0.114	0.126	0.115	0.129	0.133	0.091	0.131
	h''	0.015	0.012	0.016	0.014	0.016	0.016	0.008	0.017
e		0.82	0.83	0.79	0.77	0.78	0.80	0.82	0.80

この 8 回の測定値の平均をとって、ボールとピンの反発係数を 0.80 とした。

2.3 ボールと床の間の動摩擦係数の測定

ボウリング場にて、レーザーポインターで二点間の距離を測定した。このレーザーポインターは一定の時間ずつ距離を測定することができる。ボールの距離の変化を時間で割った平均の速度が、時間の中点における瞬間の速度とみなし、 $v-t$ グラフを描く。この傾きから加速度 a を求め運動方程式 $ma=F$ から摩擦力 F が求められる。動摩擦係数を μ' とすると $F=\mu' mg$ となり、ここから動摩擦係数を求めた。その結果平均値は 0.010 となった。

2.4 ピンと床の静止摩擦係数の測定

ピンはボールと衝突後床を滑るわけではないが、unity 内に代入する必要があるため測定した。この研究では、実証実験で用いた紙とピンの底面間の静止摩擦係数を測定した。学校でピンを紙の上に乗せ、ピンの重心の高さの位置にばねばかりをつけ、それを引き、ピンが紙の上を滑った時のばねばかりの示した力を測定する。静止摩擦係数を μ 、ばねばかりの示した力を F とすれば、 $F=\mu mg$ となり、ここから静止摩擦係数を求める。その結果、静止摩擦係数は 0.33 となった。

3. 本実験 I (unity の作成)

本実験 I ではピンを並べて、ボールがピンに当たる位置と角度を変化させてどのような値でストライクになるかを調べる。この実験では 1 ピンのどの位置にどのような角度で入射すれば、ストライクになりやすいか調べるものである。そのため、レーン上をピンが転がる軌道については考えないものとする。よって、ボールの回転については考慮しないものとする。その

ため、回転摩擦についても考慮しないものとする。

3.1 初めに代入した値

ボールの質量を 6.35kg、直径の大きさを 21.8cm、ピンの質量を 1.59kg、ピンとピンの間の距離を 0.305m として unity 内にその値を代入した。質量は unity 内に内蔵されている Rigidbody というものを用い、それに代入した。次に、予備実験で求めた反発係数、動摩擦係数、静止摩擦係数の値を new Material に代入した。

3.2 モデリング

統合型 3DCG ソフト Blender を用いてピン、ボール、壁、床のモデリングを行った。ピンの形状は日本ボウリングルールと同じものにした。このモデリングによって正確なピンの形と床、壁の形を再現できた。



図 2 ; ピンのモデリング 図 3 ; 床と壁のモデリング

3.3 当たり判定のつけ方

当たり判定とは、unity のシミュレーションで二物体が衝突したかどうか判定するものであり、物体の形状を決定するものである。本実験では、図 4 のように Capsule Collider というものを組み合わせることで当たり判定をつけた。また、unity には円柱形の当たり判定が内蔵されておらず、Capsule Collider の当たり判定を付けると底が球形になってしまい、ピンと形状が大きく異なってしまった。そこで Box Collider を 20 個ほど組み合わせ、位置を調整することで、底面を平らにして、かつ円形を表現できた。このようにして、ピンの形状により近づけることができた。



図 4 ; 当たり判定の様子

3.4 スクリプト作成

unity に入っていないプログラムを C# スクリプトというソフトを用いてプログラムを書いた。初速度を与えるスクリプトと重心の位置を与えるスクリプトを書いた。図 5 のスクリプトは初速度を与えるものである x 軸方向、y 軸方向、z 軸方向の初速度を入力することができ、初速度を自在に変えられる。図 6 のスク

リフトは重心の位置を変更できるものである。重心のxyz座標を入力し重心の位置を変更する。この実験ではピンを糸につるし、その糸の延長線上に重心があると考えた。数回糸をつるす位置を変え、それぞれで得られた延長線の好転を画像で認識し、その交点の位置をunity内に代入した。



図5；初速度を与えるスクリプト



図6；重心の位置を与えるスクリプト

4.本実験Ⅱ(実証実験)

本実験Ⅱではunityでの実験の実証性を確かめるために、実際にボールとピンを用いて実証実験を行った。この実験では、まずボールを実際に転がしその様子を撮影する。そして、同じ初期値でunityでも実験を行い、二つの結果を比較する。

4.1実験方法

図6のようにスロープを固定してコースを作った。そのコース上にボールを転がし、ピンに当たる様子を図7のようにカメラで撮影する。ボールが当たった後のピンの位置を確認するために、下に目盛りをおいておく。最初は1ピンの真ん中に当て、その後1cmずつずらし、同様の実験をボールが1ピンに当たらなくなるまで行う。1ピンの真横に一台、1ピンから30cm手前の線上にもう一台カメラを設置し、それぞれの地点を通過した時間をスローカメラで撮影する。そして、0.3mを通過するのにかかった時間でピンに当たる直前の速度を決定する。



図7；実証実験の様子



図8；実証実験の撮影の様子

4.2 実験結果

上記の方法でピンの位置を測定し、ピンが飛んだ角度を測定した。次に上記の方法で測定したボールの位置

と速度をunity内に代入し、シミュレーションを行い、unity内でピンが飛んだ角度を測定した。その結果を表3に示した。実証実験でもunityでも2回目と3回目は1ピンが2ピンに当たらず、4回目以降は1ピンが2ピンに当たった。しかし、1ピンが2ピンに衝突した後の1ピンの進む角度を測定するのは困難であったため、測定しないことにした。また、二列目の左のピンを2ピン、右の3ピンとする。

2ピン、3ピンそれぞれでunityと実証実験でピンが飛んだ角度をグラフにした。その結果を図9、図10に示す。この表とグラフからunityと実証実験の結果は合致性があるといえる。

表3；2ピンと3ピン飛んだ角度(実証実験、unity)

中心からの距離	ピンが飛んだ角度(°)					
	2ピン			3ピン		
	Unity	実証実験	角度差	Unity	実証実験	角度差
0cm	55	58	3	59	62	3
1cm				52	49	3
2cm				41	47	6
3cm	70	68	2	38	40	2
4cm	68	71	3	46	41	5
5cm	42	49	7	36	38	2
6cm	41	47	6	22	24	2
7cm	52	51	1	17	23	6
8cm	50	52	2	14	19	5
9cm	49	48	1	13	8	5
10cm	52	43	9	10	7	3
11cm	40	43	3	5	6	1
12cm	37	34	3	3	2	1
13cm	24	19	5	0	3	3

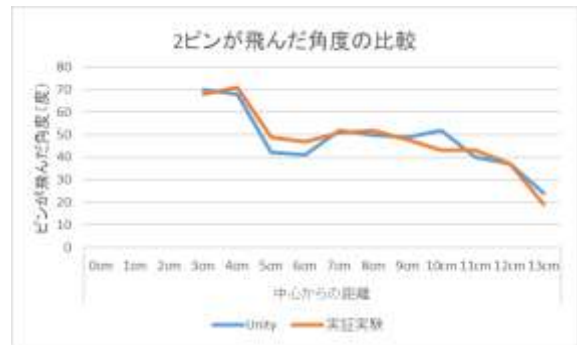


図9；2ピンが飛んだ角度の比較

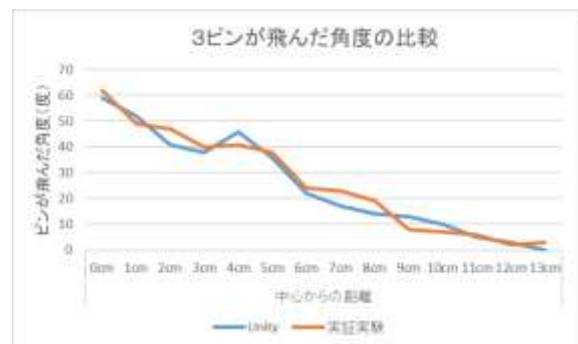


図10；3ピンが飛んだ角度の比較

5. 本実験Ⅰの結果

unity内でボールがピンに当たる位置を、1ピンの真ん中から1mmずつずらしていき、シミュレーションを行った。なお、1ピンに当たらなくなるまでシミュレーションを行った。入射角0度でボールを転がした

ときの結果を図 11 に示す。この時ボールの初速度は 26km/h で一定にした。

この実験では、134 回の実験で 37 回ストライクになったため、ストライク確率は 27.6% となった。

次に、ボールの入射角を 3 度として同様のシミュレーションを行い、その結果を図 12 に示した。この実験では 130 回の実験で 51 回ストライクになったので、ストライク確率は 39.2% となった。

次に、ボールの入射角を 6 度として同様の実験を行い、結果を図 13 に示した。126 回の実験で 49 回ストライクになったので、ストライク確率は 38.8% となった。

次に中心からの位置を 0cm~1cm、1cm~2cm というように区切り、それぞれでのストライク確率を求めた。その結果を図 14 に示す。概して 0cm~3cm の区間でのストライク率は低く、4cm~10cm の区間ではストライク率が高いことがわかる。また、入射角が 0 度の時よりも 3 度、6 度の時の方がストライクが出やすいことが分かる。

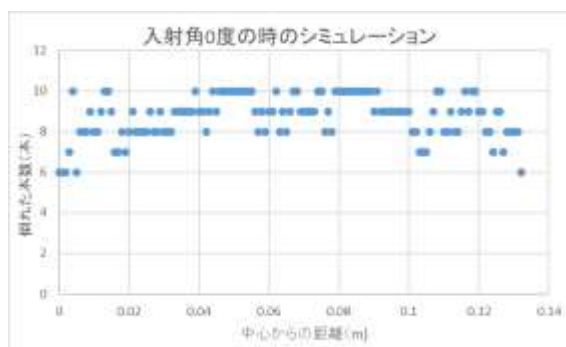


図 11 ; 入射角 0 度でのシミュレーション

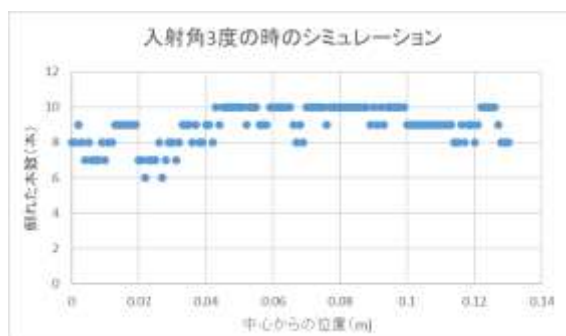


図 12 ; 入射角 3 度でのシミュレーション

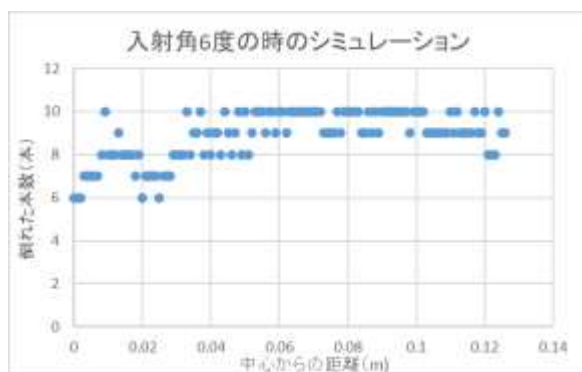


図 13 ; 入射角 6 度でのシミュレーション

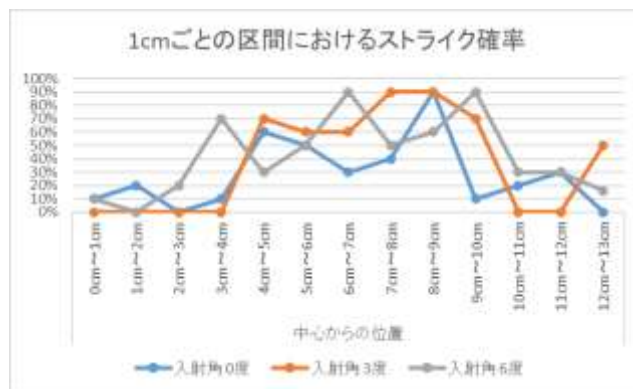


図 14 ; 1cm 区間でのストライク確率

6. 結論

上記より、3 つの入射角において中心から 4 cm~10 cm 離れているところでボールを転がすと、ストライクになりやすいといえる。また、入射角 0 度の時よりも 3 度、6 度の時の方がストライクになる確率が高かったため、ボールを投げる際は 3 度~6 度の角度をもって投げる必要があるといえる。よって、この研究から初期位置が 4cm~10cm の位置で 3 度~6 度の角度で入射させたとき、ストライクを高確率で取れることが分かる。これは先述したプロボウラーが狙っているストライクの取り方と同じである。

7. 展望

この研究を通して、ストライクになる条件を unity を用いて求め、それを論証することができた。また、unity の結果の実証性を確かめる実験を行うことで、その実証性を確かめることができた。入射角が 3 度、6 度の時のストライク確率は 39.2%、38.8% であり変化がなかったが、図 14 から分かるように、1cm の区間ごとのストライク確率は異なっている。すなわち、それぞれの入射角に対し、異なるストライクになりやすい位置が存在していることが分かる。今後は、それぞれの角度においてどのような位置にボールを当てるべきかを調べていきたい。また、今回はストライクになるメカニズムについては研究できなかったため、今後研究していきたい。この研究を通じて、よりボウリングのストライクになるメソッドが解明され、さらにボウリングの人气が高まっていくことを期待している。

8. 謝辞

この研究を進行するにあたり、終始暖かく見守り、丁寧に指導していた清水章子先生並びにサイエンスアドバイザーの皆様へ深く感謝致します。またボールと床の間の動摩擦係数を測定する際に協力して頂いた神戸ボウリング倶楽部に感謝致します。

[参考文献]

日本ボウリングルール (NBR) <https://astro-bowl.sakura.ne.jp>