

## ルーローの三角形を車輪に用いた偏心車輪模型の運動解析

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 静岡大学大学院教育学領域 公開日: 2024-12-24 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 松永, 泰弘, 久保, 宗士朗 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.14945/0002001086">https://doi.org/10.14945/0002001086</a>

# ルーローの三角形を車輪に用いた 偏心車輪模型の運動解析

Motion Analysis of Eccentric Wheel Toys Using Reuleaux Triangle as a Wheel

松永 泰弘<sup>1</sup>, 久保 宗士朗<sup>2</sup>

Yasuhiro MATSUNAGA and Soshiro KUBO

（令和 6 年 11 月 29 日受理）

## ABSTRACT

Reuleaux triangles are figures of constant width, and they are used in everyday life as shapes of rotary engine rotor and robot vacuum. Reuleaux triangles are utilized as STEM materials that enable students to explore rolling motion through play, observation, and experiment.

In this paper, we treat the eccentric wheel toys using Reuleaux triangle as a wheel. The toy has one axle eccentric and the two wheels move closer together or further apart by oscillating the connecting rod. The curious movement of the wheels attracts the interest of learners. The use of Reuleaux triangle as a wheel complicates the motion of the eccentric wheel toy. The motion of Reuleaux triangle and the toy using Reuleaux triangle for an eccentric wheel will be clarified by the experiment and simulation analysis. The principle of operation of the model is also organised from the results of the analysis.

## 1. 緒言

平成 28 年 12 月 21 日中央教育審議会答申「幼稚園，小学校，中学校，高等学校及び特別支援学校の学習指導要領等の改善及び必要な方策等について」<sup>1)</sup>では、「2030 年とその先の社会の在り方を見据えながら，学校教育を通じて子供たちに育てたい姿」として，3 つの「できること」を挙げ，「予測困難な時代に，一人一人が未来の創り手となる」ために，「生涯にわたる学びの基盤となる資質・能力をしっかりと発揮できるようにしていくこと」が期待されている。これを受けて，「今，求められる力を高める総合的な学習の時間の展開」<sup>2)</sup>では，「探究的な見方・考え方を働かせ，横断的・総合的な学習を行うことを通して，よりよく課題を解決し，自己の生き方を考えていく生徒の姿を目指している」としており，探究の見方・考え方やプロセスを身に付けることを重視している。

また，中学校学習指導要領の改訂<sup>3)</sup>において，各教科における深い理解を伴う知識の習得に向け，「習得・活用・探究」という学びの過程が重視され，「生徒が持つ知識を活用して思考することにより，知識を相互に関連付けてより深く理解したり，知識を他の学習や生活の場面で活用できるようにしたりするための学習」，すなわち知識を活用して探究する力を育成することを目指している。さらに，中央教育審議会答申(令和 3 年 1 月 26 日)<sup>4)</sup>においては，STEAM

<sup>1</sup> 技術教育系列

<sup>2</sup> 教育実践高度化専攻 学生

教育等の教科等横断的な学習の推進による資質・能力の育成について、「急速な技術の進展により社会が激しく変化し、多様な課題が生じている今日においては、これまでの文系・理系といった枠にとらわれず、各教科等の学びを基盤としつつ、様々な情報を活用しながらそれを統合し、課題の発見・解決や社会的な価値の創造に結びつけていく資質・能力の育成が求められている」としている。

このような背景から、各教科での学習で得た知識や生活経験を活かした探究活動が可能な教材の開発が求められている。ものづくりや遊びに焦点をおいた探究教材として、松永らが開発した紙製4足受動歩行模型<sup>5)</sup>、ビー玉が転がり斜面を揺れながら移動する木のおもちゃ<sup>6)</sup>、偏心車輪模型等<sup>7)</sup>があり、製作してあそびながら探究する中で、理科のエネルギー等の知識を活かした学びの深化が報告されている<sup>8,9)</sup>。ものづくりや遊びを中心とした探究活動は学習者の興味を引き出しながら、知識を活用した探究活動において一定の教育的効果があるといえる。先行研究で開発された運動エネルギーや機構の要素を含む教材として偏心軸の車輪で動くおもちゃものづくり教材(以下、偏心車輪模型、図1)を取り上げる。偏心車輪模型は接続棒によって2つの車輪が接続されており、車輪同士が近づいたり離れたりしながら接続棒を揺動させ移動する(図2)。このとき、車輪、接続棒の相対運動は往復スライダクランク機構と同じ運動となる。偏心車輪模型教材に関する研究は、幼稚園児を対象とした実践<sup>10)</sup>、小学生を対象とした実践<sup>11)</sup>が行われ、学習者が思考を働かせ、協働しながら探究できる教材として効果が報告されている。また、模型の動作原理が明らかにされており、さらに車輪の形状を変更することで、探究の幅が広がる可能性がある教材である。

そこで、本研究では、偏心車輪模型を発展させた教材として、偏心車輪をルーローの三角形に変更した模型を開発する。ルーローの三角形は円と同じ定幅図形であり、生活の中の身近なものではロータリーエンジンのローター<sup>12)</sup>やロボット掃除機<sup>13)</sup>の形状等に用いられており、高校数学の図形でも取り扱う内容である。本研究で扱うものづくり教材としての模型は、実物を製作し、図形が転がる様子や軌跡を実験や観察をしたり、作図したりして探究できるSTEAM教材としての活用が考えられる。教材の動きの中に含まれる科学的探究内容を明らかにするため、偏心車輪模型の後輪にルーローの三角形を使用し、製作した実験用模型の運動解析を行う。また、動画解析およびシミュレーション解析を行い、模型の動作原理について明らかにする。



図1 偏心車輪模型

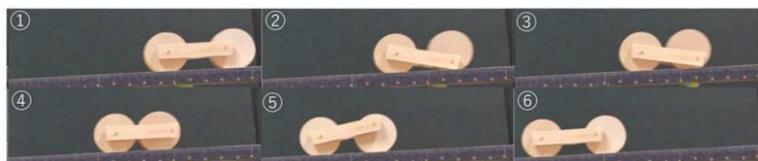


図2 偏心車輪模型の運動の様子

## 2. 斜面を転がるルーローの三角形の運動解析

本章ではルーローの三角形が斜面を転がる運動を実験から明らかにする。ルーローの三角形の回転運動を明らかにするために、実験用模型を用意し、斜面上を転がる回転運動を分析する。また、ルーローの三角形が回転可能な傾斜角において運動を解析するうえでの問題点から拡張型ルーローの三角形の模型を製作し、比較実験を行う。

### 2.1 実験用模型の製作

ルーローの三角形が斜面を転がる様子を明らかにするため、実験用模型を製作した。製作したルーローの三角形の模型と CAD 図を図 3 に示す。ルーローの三角形の重心は、頂点を通る中心線を頂点から  $20\sqrt{3}\text{mm} : (60 - 20\sqrt{3})\text{mm}$  に内分する点となる。ルーローの三角形は  $1.5^\circ$  の斜面では、接地点が頂点に近づいたが重心位置を上昇させ、頂点を乗り越えて回転することができないため、途中で停止する。また、斜面角度を  $4^\circ$  以上に設定すると停止せずに転がるが、頂点が斜面に衝突する際に飛び跳ねるため、画像による解析は困難であった。そこで、定幅量を変えないで車輪が滑らかに転がるよう半径  $45\text{mm}$  と半径  $15\text{mm}$  の円弧を組み合わせて拡張した拡張型ルーローの三角形を製作した。拡張型ルーローの三角形の模型と CAD 図を図 4 に示す。拡張型ルーローの三角形の重心は頂点を通る中心線を頂点から  $(15 + 10\sqrt{3})\text{mm} : (45 - 10\sqrt{3})\text{mm}$  に内分する。また、部品表を表 1 に示す。模型は MDF(密度： $0.77\text{g/cm}^3$ )を用いて製作した。

製作した実験用模型を使用して、偏心量を変更した実験を行い、動画解析により模型の運動を明らかにする。実験では斜面から離れることなく転がる回転運動について扱う。

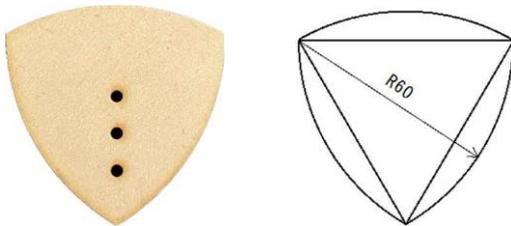


図 3 ルーローの三角形の模型と CAD 図

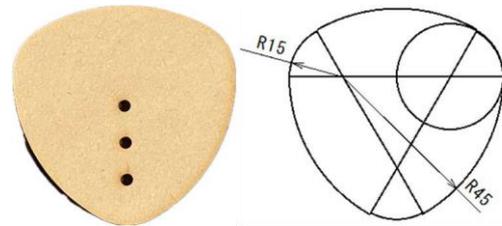


図 4 拡張型ルーローの三角形の模型と CAD 図

表 1 実験用模型部品表

形状	材質	寸法[mm]	面積[mm <sup>2</sup> ]	質量[g]	中心線上の重心位置[mm]
ルーローの三角形	MDF	幅 60*	$1800(\pi - \sqrt{3})$	39.3	$(20\sqrt{3}, 60 - 20\sqrt{3})$
拡張型ルーローの三角形			$1125\pi - 450\sqrt{3}$	43.0	$(15 + 10\sqrt{3}, 45 - 10\sqrt{3})$

※幅：図形の両側から接する二本の平行線間の距離

### 2.2 拡張型ルーローの三角形の回転実験と動画解析

拡張型ルーローの三角形が斜面を転がる回転運動を実験から明らかにする。拡張型ルーローの三角形の模型を使用し、斜面上で実験を行う。実験条件を示す。

[実験条件] 斜面： $1.5^\circ$ 、ヒノキ板材 模型の幅： $60\text{mm}$

模型形状：拡張型ルーローの三角形

拡張型ルーローの三角形の初期状態は、最も重心位置が最も高い状態(頂点と重心が斜面に垂直な線上にある状態)とした。拡張型ルーローの三角形の模型が斜面を運動する様子を  $30\text{fps}$  のコマ送り画像に分解し、CAD ソフト(JW-CAD)上で角度を測定し、その変化量から角速度を算出した。拡張型ルーローの三角形の角速度の時間変化を図 6 に示す。

拡張型ルーローの三角形の角速度は上昇と下降を繰り返す、極大値、極小値が 1 回転に対し

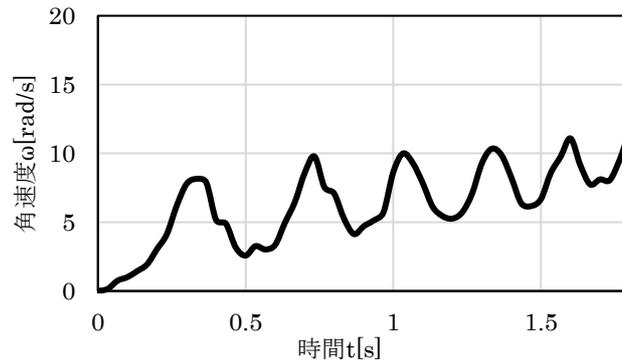


図6 斜面を転がる拡張型ルーローの三角形の角速度の時間変化(実験)

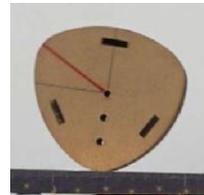
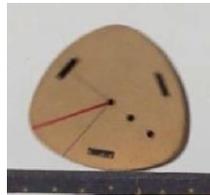


図7 角速度が極大値を示す瞬間の状態 図8 角速度が極小値を示す瞬間の状態

それぞれ3回現れる。角速度の極大値は、ルーローの三角形の重心が最も低い位置付近にある状態(図7)で生じる。重心位置が高くなるにつれて角速度は下降し、重心が最も高い位置付近にある状態(図8)で極小値を示す。また、重心位置が低くなるにつれて角速度は上昇する。この変動を繰り返しながら回転し、極大値・極小値ともに上昇する。角速度の時間変化は、斜面を回転しながら下がっているだけでなく、重心位置の高さの変化に影響を受ける。

### 2.3 拡張型ルーローの三角形のシミュレーション解析および実験値との比較

シミュレーションソフト Working Model 2D を用いて、シミュレーション解析を行う。斜面の角度(1.5°)や初期状態は実験条件と同じ条件とする。

円板と拡張型ルーローの三角形の角速度のシミュレーション結果を図9に示す。円板が斜面を転がる回転運動は理論解析により解が求まる。図9を考察するために解析を以下に示す。

角度 $\theta$ の斜面を転がる質量 $m$ 、半径 $R$ の円柱の運動方程式は

$$mg \sin \theta - F = ma, \quad FR = I\beta, \quad a = R\beta \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 $a$ は加速度、 $\beta$ は角加速度、 $F$ は摩擦力、 $g$ は重力加速度である。

また、円板の慣性モーメント $I$ は

$$I = \left(\frac{2}{5}\right) mR^2 \quad (2)$$

したがって、加速度 $a$ 、角速度 $\beta$ は次式となる。

$$a = \frac{2}{3} g \sin \theta, \quad \beta = \frac{2}{3R} g \sin \theta \quad (3)$$

式(3)に $\theta = 1.5^\circ$ を代入すると  $\beta \doteq 5.70 \text{ rad/s}^2$  を得る。

図9において、円板の角速度 $\omega$ は時間とともに比例関係で増加し、角加速度 $\beta \cong 5.70\text{rad/s}^2$ の直線となり、理論値と一致する。ルーローの三角形の角速度の増減の様子(波形)は実験とシミュレーションで一致しており、角速度が増加するとき、重心の位置は高い位置から低い位置へ移動する。逆に角速度が減少するときは、重心の低い位置から高い位置へ移動する。極値群の近似直線の傾きは円板より小さく時間とともに円板の角速度がルーローの三角形より大きくなることからわかるルーローの三角形は1回転の中で角速度の極大値、極小値をそれぞれ3回取ることがわかる。また、極大値、極小値について実験値とシミュレーションの値との比較を表2に示す。極大値において、10%以内の誤差で一致していることがわかる。

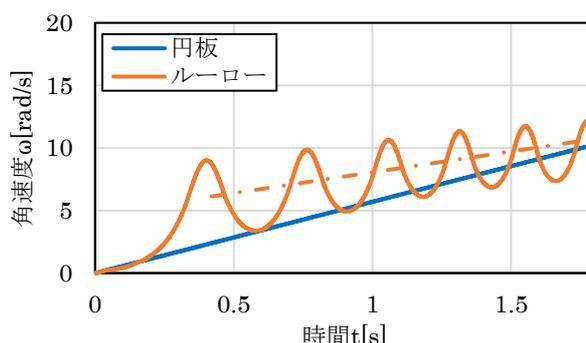


図9 斜面を転がる拡張型ルーローの三角形単体の角速度の時間変化(シミュレーション)

表2 拡張型ルーローの三角形の角速度の時間変化に現れる極大値・極小値の比較

No	実験値				シミュレーション			
	時間[s]	極大値[rad/s]	時間[s]	極小値[rad/s]	時間[s]	極大値[rad/s]	時間[s]	極小値[rad/s]
1	0.33	8.1	0.50	2.6	0.42	8.71	0.58	3.38
2	0.73	9.8	0.87	4.1	0.74	9.46	0.91	4.93
3	1.05	10.0	1.20	5.3	1.05	10.6	1.17	6.14
4	1.31	10.3	1.47	6.2	1.31	11.4	1.44	6.88

### 3. 拡張型ルーローの三角形を車輪に用いた模型の運動解析

本章では、拡張型ルーローの三角形を偏心車輪に用いた模型の運動の様子を、実験とシミュレーションから明らかにする。

#### 3.1 拡張型ルーローの三角形を偏心車輪に用いた模型の実験と動画解析

製作した実験用模型(図10)は、接続棒、車軸、円板型車輪、ルーローの三角形型車輪(偏心車輪)から構成されている。2つの車輪は接続棒によって連結されており、ルーローの三角形を偏心車輪とした。部品図を図11、部品表を表3に示す。

ルーローの三角形を用いた偏心車輪模型を斜面上で転がし、動作を詳細に分析する。実験用模型は図10を用いる。模型の動きを撮影した動画を30fpsのコマ送り画像に分解し、車輪の角速度を算出する。

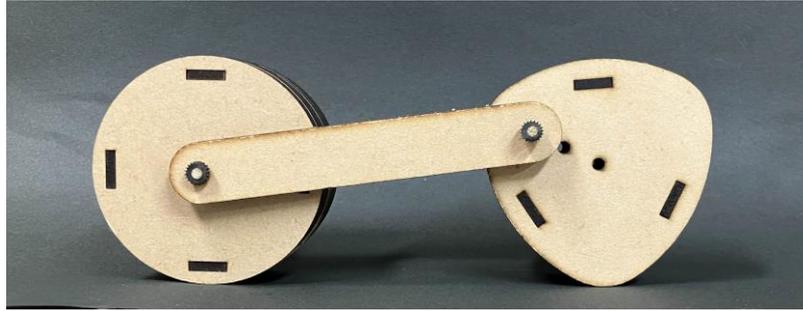


図 10 拡張型ルーローの三角形を偏心車輪に用いた模型

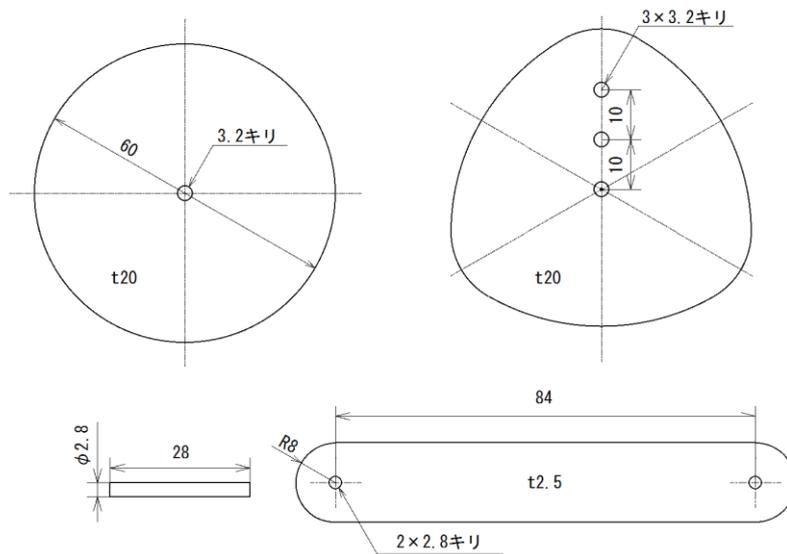


図 11 模型の部品 CAD 図

表 3 偏心車輪模型の部品表

部品	材質	寸法[mm]	質量[g]×数
円板	MDF	$\phi 60 \times t20$	44.0×1
拡張型ルーローの三角形		幅 $60 \times t20$	43.0×1
接続棒		$100 \times 16 \times t2.5$	3.2×2
軸	竹ひご	$\phi 2.8 \times 20$	0.1×2
スペーサ	ストロー	$\phi 4.0 \times 1.0$	0.03×4
止め輪	ゴムチューブ	$\phi 5.0 \times 1.0$	0.05×4

実験条件を以下に示す。

斜面角度： $1.5^\circ$     偏心量：20mm    前輪：円板    後輪：ルーローの三角形

斜面の角度は、偏心車輪に拡張型ルーローの三角形を用いた模型が動作可能かつ、車輪の運動が測定可能である  $1.5^\circ$  に設定した。模型の前輪、後輪の角速度の時間変化を図 12 に示す。比較対象として、円板のみを用いた偏心車輪模型の角速度の時間変化を図 13 に示す。2 つの図

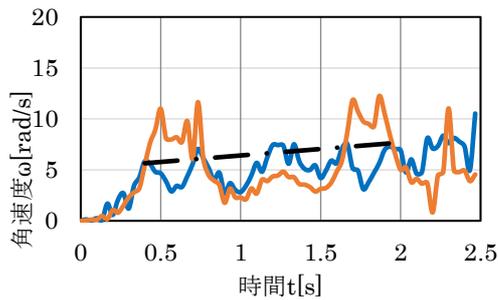


図 12 ルーローの三角形を偏心車輪に用いた模型の角速度の時間変化(実験)

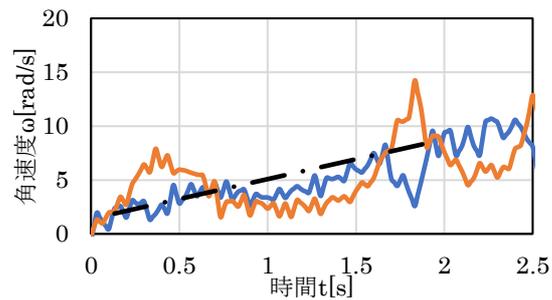


図 13 円板のみを用いた模型の角速度の時間変化(実験)

において前輪と後輪の角速度が一致した点を抽出し、角速度の上昇を直線で近似した。図 13 に見られるように偏心車輪模型の車輪の角速度は、接続棒の拘束による押し合い、引っ張り合いの影響により増加、減少が起こることが明らかになっている。図 12 のルーローの三角形についても、前輪と後輪の関係は、偏心軸と接続棒の拘束によって近づいたり離れたりを繰り返す。また、時間が 0.40s, 0.73s, 1.67s, 1.93s で両輪の角速度が一致する。4 つの一致する点のうち、0.40s, 1.67s で前輪と後輪は最も離れた位置にあり、また、0.73s, 1.93s で前輪と後輪は最も近づいた位置にある。0.40~0.73s では、両輪は近づく行程であり、後輪に 2 つの極大値が現れる。これは偏心軸が頂点寄りに偏心していることにより、近づく行程で 1 つの頂点を乗り越える際に極小値、その前後で極大値を示す。また、0.73s~1.67s では、両輪は離れる行程であり、後輪に 1 つの極大値が見られる。また、近似直線の傾きから円板のみの模型のほうが角速度の上昇が大きいことがわかる。

したがって、ルーローの三角形の形状と重心の高さの変化により、角速度変化は複雑になる。次節では、2D シミュレーションを行い、角速度の変化を詳細に解析する。

### 3.2 拡張型ルーローの三角形を偏心車輪に用いた模型のシミュレーション解析 および実験値との比較

シミュレーションソフト Working Model 2D を用いて、シミュレーション解析を行う。斜面の角度(1.5°)および初期状態は実験条件と同じ条件とする。

ルーローの三角形を後輪に用いた模型の車輪の角速度の時間変化を図 14 に示す。比較対象として円板のみを用いた模型の車輪の角速度の時間変化を図 15 に示す。2 つの図において前輪と後輪の角速度が一致した点を抽出し、角速度の上昇を直線で近似した。円板のみを用いた模型では 1 周期につき、極大値と極小値が 1 回ずつ現れるのに対して、ルーローの三角形の模型では極大値と極小値が 3 回ずつ現れる。0.28s, 0.64s, 1.19s, 1.43s で両輪の角速度が一致する。0.33s, 1.19s で前輪と後輪は最も離れた位置にある。また、0.64s, 1.43s で前輪と後輪は最も近づいた位置にある。0.28~0.64s では、両輪は近づく行程であり、後輪に 2 つの極大値が現れる。これは偏心軸が頂点寄りに偏心していることにより、近づく行程で 1 つの頂点を乗り越える際に極小値、その前後で極大値を示す。また、0.64s~1.19s では、両輪は離れる行程であり、後輪に 1 つの極大値が見られる。

ルーローの三角形のみを転がした際と同様に、偏心車輪模型の運動もルーローの三角形の形

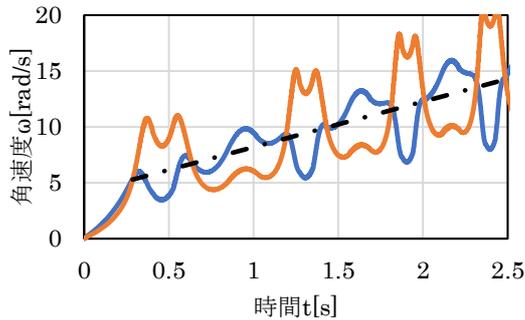


図 14 ルーローの三角形を偏心車輪に用いた  
模型の角速度の時間変化(シミュレーション)

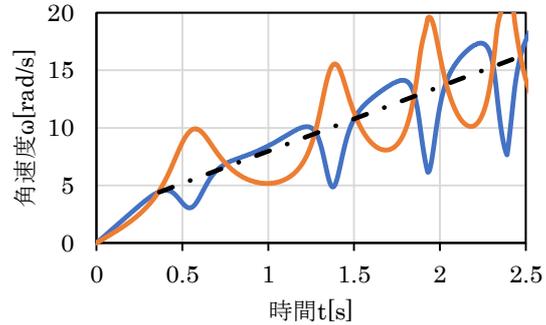


図 15 円板のみを用いた  
模型の角速度の時間変化(シミュレーション)

状に影響を受け、角速度の極値が増減していることが分かる。円板のみを用いた模型とルーローの三角形を用いた模型の周期を比較すると、ルーローの三角形を用いた模型の方が約 3%長い。前輪の角速度が一致する点を比較すると、円板のみの模型の方が角速度上昇の傾きが大きく表れる。これはルーローの三角形と円板単体との回転運動の影響を受けていることがわかる。したがって、ルーローの三角形の重心位置の上下、接続棒の拘束による押し合い、引っ張り合いが影響し合い、角速度変化が複雑になる。

また、実験値とシミュレーションの結果を比較する。角速度の上昇は、2つの模型ともに実験の方がゆるやかであり、周期が長くなる。車輪や接続棒の軸の部分の摩擦をシミュレーションで考慮されていない影響と考えられる。

#### 4. 動作原理

シミュレーション解析で得られた結果をもとに、模型の運動をいくつかの Step に分割し、動作原理を明らかにする。シミュレーションのコマ送り画像から、模型の運動の 1 周期分を両輪の角速度の曲線の交点および極値を示す点を基準点として 11 段階に分け、図 16 に示す。また、車輪の動作原理と運動が変化する瞬間の状態を図 17 に示す。各瞬間における模型の動作原理を以下に示す。

**Step①** : ルーローの三角形の頂点と重心を結ぶ線が斜面と垂直の状態(初期状態)。

①～① : 前輪が接続棒によって押されるため、角速度が前輪 > 後輪の関係を保ちながら上昇していく。

【①～⑦ : 2つの車輪が近づいていく行程。角速度は常に後輪 > 前輪の関係となる。】

**Step①** : 2つの車輪が最も離れ、角速度が一致する。

①～② : ルーローの三角形の重心位置が下降し、角速度が上昇していく。

**Step②** : 前輪の角速度が極大値をとる。

②～③ : 後輪の回転によって、接続棒が前輪を引っ張る力が生じ、前輪の角速度は下降する。また、ルーローの三角形の重心位置が上昇する。

**Step③** : 後輪の角速度が極大値をとる。

③～④ : ルーローの三角形の重心位置が上昇し、角速度が減少していく。

**Step④** : ルーローの三角形の重心位置が最も高くなり、前輪、後輪の角速度が極小値をとる。

④～⑤ : ルーローの三角形の重心位置が下降し、後輪の角速度が上昇する。前輪は接続棒に押され、角速度が上昇する。

**Step⑤** : ルーローの三角形は重心位置を下げながら接続棒を持ち上げ始める。後輪の角速度が極大値を取る。

⑤～⑥ : ルーローの三角形の重心位置が最も低くなる。その後、前輪は接続棒に押され、角速度が上昇するが、ルーローの三角形の重心位置が高くなることにより上昇が緩やかになる。後輪は接続棒を持ち上げるため、角速度が減少する。

**Step⑥** : ルーローの三角形の重心位置が最も高くなり、前輪の角速度が極大値をとる。

⑥～⑦ : 前輪は後輪に引っ張られ、角速度が減少する。

**Step⑦** : 前輪と後輪が最も近づき、角速度が一致する。

【⑦～⑫ : 2つの車輪が離れていく行程。角速度は常に前輪 > 後輪の関係となる。】

**Step⑦** : 前輪と後輪が最も近づき、角速度が一致する。

⑦～⑧ : 後輪は⑥～⑦の状態が継続しているが、接続棒が前輪を引っ張る力が生じなくなり、前輪の角速度は上昇する。

**Step⑧** : 前輪の角速度が極小値をとる。

⑧～⑨ : 接続棒に働く重力によるモーメントの影響を受け、後輪の角速度が減少する。接続棒の位置エネルギーは上昇する。

**Step⑨** : 後輪の角速度が極小値をとる。

⑨～⑩ : ルーローの三角形の重心位置が下降し、角速度が徐々に上昇する。

**Step⑩** : 前輪の角速度が極大値を取り、その後、後輪の角速度が極大値を取る。接続棒の位置は最も高くなる。

⑩～⑪ : ルーローの三角形の重心位置が上昇するため、前輪、後輪の角速度が減少する。接続棒は最も高い位置を通過する。

**Step⑪** : 後輪の角速度が極小値を取り、その後、前輪の角速度が極小値を取る。

⑪～⑫ : 接続棒の位置が下がり、ルーローの三角形の重心位置も下がるため、前輪、後輪の角速度が上昇する。

**Step⑫** : 再び前輪と後輪の角速度が一致する。Step①の状態に戻る。

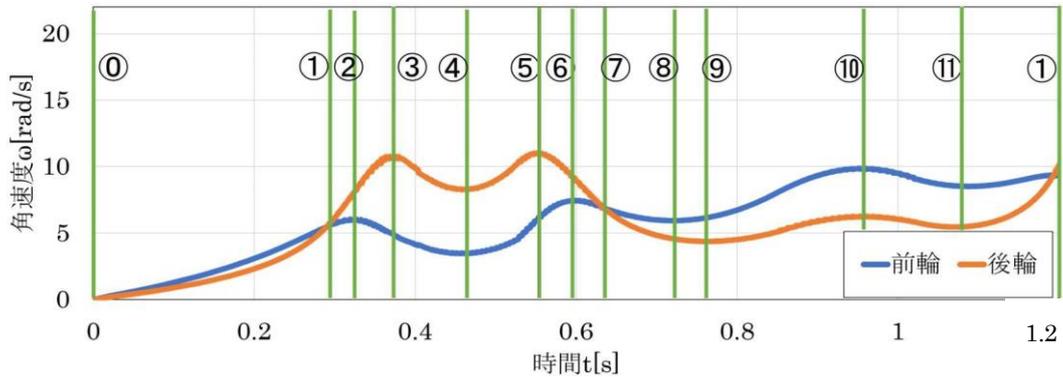


図 16 拡張型ルーローの三角形を用いた偏心車輪模型の角速度の時間変化(1 周期分)

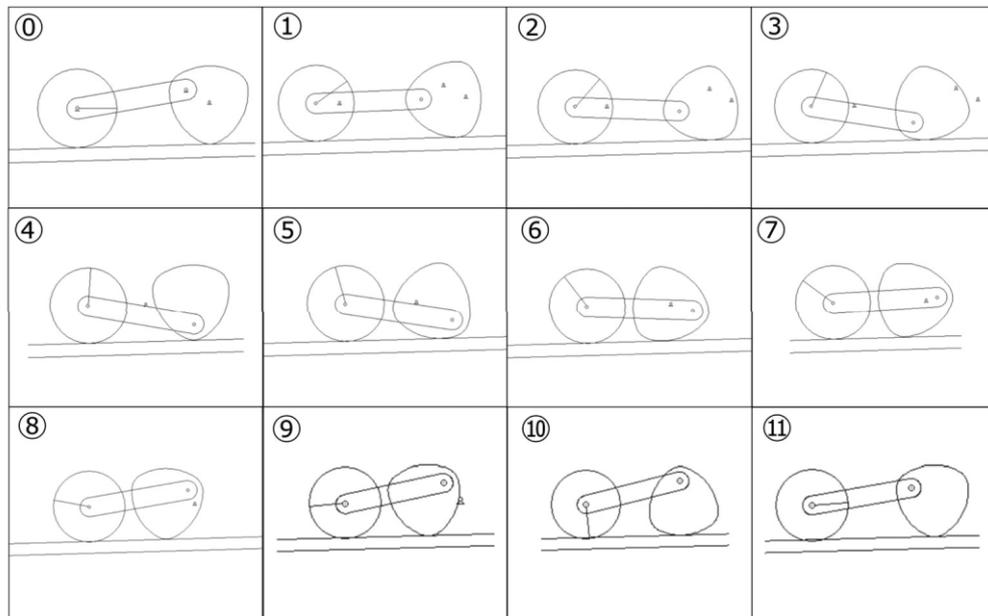


図 17 各瞬間における模型の状態

シミュレーション解析の結果、両輪の角速度が変動する場面(各Step)で模型の状態が明らかになり、力学的根拠による分析がなされた。

## 5. 結言

本研究では、偏心軸の車輪で動くおもちゃ探究教材に高校数学の学習内容であるルーローの三角形を車輪として組み込み、実験用模型を製作し、模型の運動について動画解析およびシミュレーション解析を行い、以下のことを明らかにした。

- ・ルーローの三角形は斜面を滑らかに転がらないが、頂点に半径の小さい円弧を用いて拡張することで、滑らかに転がることを明らかにした。
- ・拡張型ルーローの三角形を単体で転がした場合の回転運動を解析し、1 回転中に極大値と極小値を 3 回ずつ取る回転運動の様子を明らかにした。また、角速度の変動と拡張型ルーローの

三角形の状態(接地点と重心)を対応させ、力学的根拠による角速度の変化を明らかにした。

・偏心車輪模型の後輪(偏心車輪)に円板を用いた場合と、拡張型ルーローの三角形を用いた模型を製作し、斜面を転がる回転運動を実験により明らかにした。また、回転運動の結果から、角速度の時間変化を明らかにした。

・シミュレーション解析から模型の角速度の変動と各瞬間の車輪と連接棒の状態を対応させ動作原理について明らかにした。拡張型ルーローの三角形の重心の上下動、連接棒による両輪の拘束の影響が絡み合い、1周期中に角速度の極大値、極小値がそれぞれ3回現れ、拡張型ルーローのさんかくけいの形状が大きく影響していることが明らかとなった。

本研究は松永泰弘研究基金の助成による。

## 参考文献

- 1) 中央教育審議会：幼稚園、小学校、中学校、高等学校及び特別支援学校の学習指導要領等の改善及び必要な方策等について（答申）（中教審第197号）（2016），  
[https://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/chukyo/chukyo0/toushin/1380731.htm](https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chukyo/chukyo0/toushin/1380731.htm)（最終アクセス日：2024年10月15日）
- 2) 文部科学省：今、求められる力を高める総合的な探究の時間の展開(2022),  
[https://www.mext.go.jp/a\\_menu/shotou/sougou/main14\\_a2.htm](https://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/sougou/main14_a2.htm)（最終アクセス日：2024年10月15日）
- 3) 文部科学省：中学校学習指導要領解説総則編幼稚園教育要領(2019),  
[https://www.mext.go.jp/a\\_menu/shotou/new-cs/1387016.htm](https://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/new-cs/1387016.htm)（最終アクセス日：2024年10月15日）
- 4) 中央教育審議会：令和の日本型学校教育」の構築を目指して～全ての子供たちの可能性を引き出す、個別最適な学びと、協働的な学びの実現～（答申）（中教審第228号）（2021）  
[https://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/chukyo/chukyo3/079/sonota/1412985\\_00002.htm](https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chukyo/chukyo3/079/sonota/1412985_00002.htm)（最終アクセス日：2024年10月15日）
- 5) 松永泰弘, 前田耕典：みらい創造科教材としての紙製4足受動歩行模型の開発(2015) 静岡大学教育学部研究報告. 人文・社会・自然科学篇 65号, p.165-179
- 6) 松永泰弘, 安達美佑：ビー玉を使用し斜面を揺れながら移動する木のおもちゃものづくり教材を用いた保育実践(2020), 日本産業技術教育学会誌, 第62巻, 第2号, pp.123-132
- 7) 松永泰弘, 久代義頭：斜面を移動する偏心車輪模型の運動解析(2022), 日本産業技術教育学会誌, 第64巻, 第4号, pp.253-259
- 8) 松永泰弘, 古田このみ：紙製4足受動歩行模型を用いた小学生対象の授業実践, 日本産業技術教育学会誌, 第63巻, 第2号, pp.207-214 (2021)
- 9) 松永泰弘, 鳥羽美紀子, 山崎智志：幼少期における動くおもちゃものづくり・遊び・学びによる自己肯定感の育成, 公益財団法人マツダ財団, 研究報告書 vol.32 2020—青少年健全育成関係—
- 10) 松永泰弘, 久代義頭, 安達美佑：偏心軸の車輪で動くおもちゃものづくり教材を用いた保育実践(2022), 日本産業技術教育学会誌, 第64巻, 第3号, pp.233-242
- 11) 松永泰弘, 久保宗士朗：小学校低学年の遊びを中心とした偏心軸の車輪で動くおもちゃ探究教材を用いた授業実践 (2023), 静岡大学教育学部研究報告. 教科教育学篇 55巻, p.88-

101

- 12) MAZDA : MAZDA MX-30 ローターエンジンスペシャルコンテンツ(2023)  
[https://www.mazda.co.jp/cars/mx-30/special-contents/rotary\\_engine/#tab\\_anch](https://www.mazda.co.jp/cars/mx-30/special-contents/rotary_engine/#tab_anch)(最終アクセス日 : 2024 年 10 月 15 日)
- 13) Panasonic : ロボット掃除機「ルーロミニ」MC-RSC10(2019),  
<https://panasonic.jp/soji/products/MC-RSC10.html>(最終アクセス日 : 2024 年 10 月 15 日)