

資 料

体験展示「振り子のサンドアート」の開発と設置*

市川 真史¹⁾, 加藤 咲¹⁾, 増渕 佳子¹⁾,
坂井 奈緒子¹⁾

¹⁾ 富山市科学博物館
939-8084 富山市西中野町一丁目8-31

The Development and Installation of the Interactive Exhibit “Drawing Sand Art with Pendulum”

Shinji Ichikawa¹⁾, Saki Kato¹⁾,
Yoshiko Masubuchi¹⁾ and Naoko Sakai¹⁾

¹⁾ Toyama Science Museum
1-8-31 Nishinakano-machi, Toyama 939-8084, Japan

1. はじめに

当館にとって6年ぶりの新たな常設展示として、振り子で砂の模様を描く体験型装置を、1階ロビーに設置した。本展示は、科学や博物館への期待と高揚感を高めるモニュメント的な役割を果たすもので、大きく、美しく、見栄えの良い展示となることを目標として作られたものである。

本展示は、Y字型のヒモに吊り下げられた振り子を揺らすことで美しい幾何学模様を描く装置である。その模様は、19世紀中頃にフランスの物理学者リサージュが自作の装置で描いて見せたことにちなみ「リサージュ図形」と呼ばれており、その図形をY字型の振り子で描くという方法は、イギリスの数学者ブラックバーンが同じく19世紀中頃に考案し「ブラックバーン振り子」と呼ばれている(長倉ほか, 1998; Pook, 2011a; Pook, 2011b)。簡単な仕組みで美しい幾何学的な模様を描くことができ、体験者の科学的興味を強く惹き付けることから、国内各地の科学館で既に数多く展示されている。当館の導入前にこれら先行展示を調査したところ、改善すべき課題や製作における注意点が見出された。

本稿では、これらの課題の解決を図りつつ、当初の目標達成を目指して、新たな展示装置を製作したので報告する。

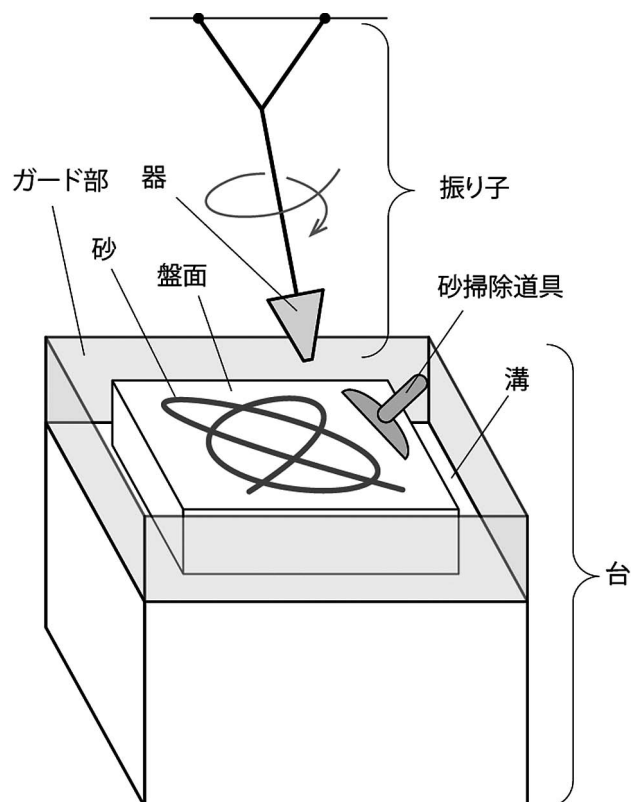


図1 装置の基本構成。

2. 先行展示の調査

2.1. 調査方法

本装置の基本構成を図1に示す。Y字型のヒモに吊り下げられた振り子の重り部分は、砂を入れるための器の役割も果たす。器の底には小さな穴が開けてあり、入れた砂が徐々にこぼれ落ちるようになっている。砂を入れて振り子を揺らすと、振り子の軌跡が下に配置した台の盤面上に砂の線として残り、体験者はこの幾何学模様を観察することで、振り子の不思議な動きを実感できる。砂の模様が残された盤面は、体験後に体験者自身がほうきなどを使って掃除し、砂を盤面の周囲または一部にある溝に落として集める。集めた砂を再び器に入れることで、次の体験が開始できる。

こうした装置の特徴から、先行展示の調査ではユーザー体験に重点を置き、a.砂を入れる、b.振り子を揺らす、c.砂で描画する、d.盤面の砂を掃除する、e.その他、の5項目で使い勝手を調査した。

調査対象としたのは、設置館に聞き取り調査した展示8件、およびインターネットによる調査で見つかった展示2件(あすたむらんど, 2020; 竹本, 2017)の計10件(表1)である。当館の展示製作において特に参考にな

* 富山市科学博物館研究業績第585号

表1 調査対象とした先行展示.

館名	つくばエキスポセンター	新潟県立自然科学館	バンドー神戸青少年科学館	山口県立山口博物館	名古屋市科学館	京都市青少年科学センター	倉敷・倉紡記念館	和歌山市立こども科学館	千葉市科学館	あすたむランド
場所	つくば	新潟	神戸	山口	名古屋	京都	倉敷	和歌山	千葉	徳島
振り子	吊り元	装置の支柱	天井	装置の支柱	装置の支柱	天井	天井	装置の支柱	天井	天井
	全長	1.8m	3.6m	2m	2m	2.3m	4.6m	2m強	—	約1.8m
	器形状	漏斗形	漏斗型	寸胴型	漏斗型	寸胴型	寸胴型	円錐型	寸胴型	(磁気ペン) (磁粉パネル)
台	盤形状	正方形	円形	円形	円形	正方形	正方形	円形	正方形	正方形
	盤サイズ [mm]	988	880*1200 2面	900	650	1600	880	1200	—	—
	溝形状	手前一列	外周全体	外周全体	外周全体で一部深い	角1か所	外周全体	外周全体	外周全体	なし(磁粉パネル) なし(磁粉パネル)
	掃除	刷毛→水切りワイパー	刷毛	小型ほうき	刷毛→ヘラ	自在ほうき(柄無し)	小型ほうき	水切りワイパー	—	—

と思われたつくばエキスポセンター（以下、つくば）と新潟県立自然科学館（以下、新潟）では、現地調査を行った。

2.2. 調査結果

a. 砂を入れる

砂を落とす溝が広い場合は、溝の砂を集めるために小さいほうきとチリトリが使われることが多い（例えば、つくばや名古屋など）。この場合、そのままチリトリで砂を器に入れることになるが、器の砂入れ口に対してチリトリが大きく、砂を入れにくいケースがあった。

砂を入れる最中に器の下から砂がこぼれ落ちるため、多くの館では器の底の穴を指でふさぎながら砂を入れるように注意書きをしている。

器が大きければ大きいほど、体験者は砂をできるだけたくさん器に入れようとする傾向がある。

b. 振り子を揺らす

砂を入れた器（振り子）を揺らして描画する際に、揺らし始めの位置や揺らし方によって、描かれる模様が変



図2 スタート位置の明示（新潟）。

化する。吊るしたヒモのY字型の面に対して45度の角度から揺らすと、もっとも大きく模様を描けるのに対して、0度または90度の角度から揺らすと、単なる往復の直線になる。複数館で45度の位置にスタート位置と盤面に明示していた（図2）。

振り子を引き寄せそっと手を離すと、反対側の同じ高さまで移動する。振り子を手放す際に投げ出せば、反対側では手を離れた位置以上の高さまで移動する。盤面の端から振り子を投げ出すと、反対側でガード部に振り子が激突してしまうため、「ゆっくり振り子をはなす」「そっと手をはなす」といった注意書きがされていたが、振り子を投げ出している体験者が少なからず見られた。

c. 砂で描画する

描かれる砂の模様の美しさは、装置によってばらつきがあった。砂の模様とそれが描かれる様子の美しさの要素としては、線の明瞭さ、曲線の滑らかさ、描画のスピードが挙げられる。

砂の線が明瞭で美しく感じられるのは、細いながらも砂の密度が大きく、線の輪郭が明瞭な場合である。同じ装置でも、描かせ方によって、線の明瞭さに違いが現れることがあった。その原因は、描かせる模様の大きさであり、小さく描かせた方が、砂の白線が細く濃く明瞭で美しく、大きく描かせると、砂の線は幅広く淡く不明瞭になった（図3）。その理由は、振り子は振れ幅によらず1往復する時間は同じであり、また、同じ時間内に器から出る砂の量は同じだからである。すなわち、大きく描かせても小さく描かせても、1往復の描画に使われる砂の量は一定であるため、模様が小さいと線は短くなり、長さあたりの砂の量は多くなるため砂の白線が明瞭となる一方で、模様が大きいと線は長くなり、長さあたりの砂が少なく淡くなってしまうのである。加えて模様を大きくすると揺れる動きが速くなるため、落ちる砂がちら

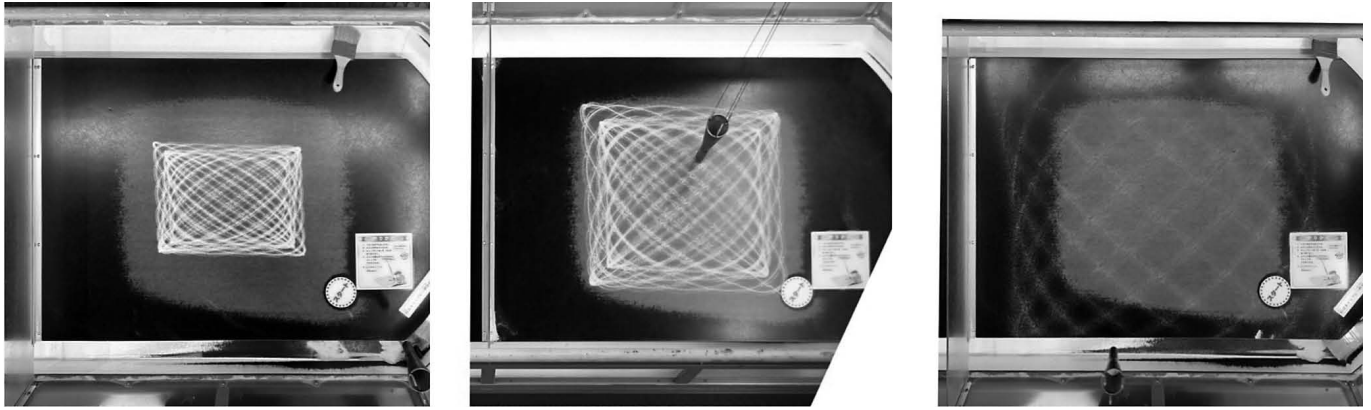


図3 揺らす幅と砂の白線の濃さ（新潟）

描画の正方形の一辺は左から 40 cm. 60 cm. 100 cm. 振り子の長さは 358 cm.

ばりやすく線が太くなり、なおさら砂の線は淡くなるのである。模様を大きくしても白線を明瞭に描かせるには、振り子をゆっくり動かすことが必要であり、つまり振り子の長さを長くすることが必要であると分かった。

砂の線の明瞭さには、盤面と器の距離も影響していた。器の位置が高すぎると、砂が盤面に落ちた際に広がってしまい、低すぎると、既に描かれた砂の白線近くを器が通過する際、その風圧で砂がばらけてしまう。

砂の線の明瞭さには線上の砂の密度が重要であり、器の底の穴を取り換え式にし、落ちる砂の量を適量に調整可能にしている館があった（例えばつくば；図4）。

曲線の滑らかさについて、振り子をゆらし始める際に、

器が細かくブレて砂の白線がうねることがあった。一方で、器を吊るす3本のワイヤーを長くしていた新潟の装置では、器のブレがほとんど起こらず、滑らかな模様を描いていた。

描画のスピードについて、振り子の動きが速いと、砂が飛び散りやすく線が太く淡くなる。また、既に描いた砂の線を、器による風圧でばらけさせてしまいやすい。その対策として、器の底の穴を大きくして砂の出る量を増やせば、線を濃くすることは出来る。しかし線は太いままで、まわりに飛び散る砂の量も増えてしまう。また、大量の砂をまき散らしながら振り子が動き回る様子は、あまり美しいものとは言えない。振り子はゆっくり動く方が美しく見えるし、描かれる砂の線も明瞭となる。

d. 盤面の砂を掃除する

盤面の砂の掃除には、幅の広い道具の方がやりやすかった。溝の砂を集めるための小さいほうきとチリトリを盤面掃除用と兼ねている館では、広い盤面を掃除するのに手間がかかった。

砂の掃除道具として、刷毛やほうきを使う場合と、水切りワイパーやヘラを使う場合があった。刷毛やほうきを使う場合、その抜け毛が砂に混じって器に入り、砂詰まりの原因となる場合があった。水切りワイパーやヘラでは、抜け毛の問題は起きない。砂詰まりの原因は、ほかに、セータなどの毛玉や綿ぼこり、髪の毛などがあった。これらの混じった砂は、篩や茶こしでこし取ったり、定期的に新しい砂に入れ替えたりしていた。

e. その他

調査した10件のうち、千葉市科学館とあすたむらんど徳島の装置は、砂で描画する代わりに磁粉パネルに磁気ペンで描画していた。さらに、あすたむらんど徳島では、磁粉パネルの乗った盤面の方を吊るして揺らし、磁気ペ



図4 交換式の先端で穴の径を調整（つくば）。

ンを壁に固定して描画していた。磁粉パネルによる描画方式は、模様がくっきりと描かれ、砂が散乱することもないため、運用上とても有効な方式と思われる。この方式の特許出願が公開されていた（株式会社パイロットコーポレーション，2007）。一方で、振り子が常に盤面と摩擦しながら動くため、揺れの収束が早くなると思われる。磁粉パネルの大きさによる制約も考えられる。

模様を描く砂は、新潟は「シリカサンド飯豊珪砂7号」を、つくばは観賞魚用の「ホワイトスイング（オーストラリアの白い砂）」を、山口は「トーヨーシリカサンド6号-1」を、神戸は「WAサンドブラスト用研磨材「ホワイトモランダムWA」#120」を使用していた。

振り子を吊るすワイヤーは、尋ねた3施設とも切れた経験があり、つくばは6年で3回、山口は年に2、3回、新潟は年間20回程度調整が必要になるとのことであった。新潟が特に多いのは、盤面が地面から100 mmと低く、しゃがんだ姿勢で振り子を触るため、子供が振り子に体重を掛けたりぶら下がったりしやすいためと思われる。また新潟では、器の壁面3か所の穴に直接ワイヤーを通して吊るしてあり、穴が摩耗により広がっていた。

新潟は、角丸長方形の盤面を左右に分割して2面とり、Y字のV部分の深さが異なる2本の振り子が描く模様を見比べられるようになっていた。

砂を貯める溝の形状は、砂で描く8件のうち、外周全体が6件で、つくばが手前一辺のみ、名古屋が角に1か所のみであった。

3. 展示の製作

3.1. 基本方針

1階ロビーに設置し、盤面は大きく（φ1200 mm）、美しく（実験装置的な印象を抑える）、子供にも使いやすく、子供がぶら下がっても破損しない強度を持たせ、描画には砂を使うことを基本方針とした。

3.2. 仕様の検討

a. 振り子

試作品のY字の振り子を、まず2.5 mの長さで試し、次に1階の吹き抜けにおいて6 mの長さで実際に設置し動きをテストした（図5）。

振り子を可能な限り長くするため、2階吹き抜け天井への吊り元設置を検討したが、メンテナンス性を考慮し、2階手すり壁の高さに天吊りフレームを設置し、足場を組まなくても手が届き、かつ6 mの高さを確保することにした。これにより、振り子がゆったりとした優雅な動きとなり、描画する砂が飛び散りにくく美しい明瞭な白線を描き、ゆれに伴う上下の動きが減るため盤面周囲の



図5 吹き抜けで試作のY字振り子をテスト。
（上から撮影したもの）

ガード部を低くでき観察しやすくなる。振り子のワイヤー設置は、通常U字金具に接続されるのみだが、強度向上のため天吊り金具に固定したベ어링で支持したシャフトに固定する方式とした。これにより、振り子の動きを滑らかにし、摩耗によるワイヤー切断を防ぐ効果が期待できる。ワイヤーには、強度のあるピクチャーレール用吊り金具を組み合わせ、高さを自由に細かく調整できるようにした。振り子下部で器を吊る3本のワイヤーを900 mmと長くし、振り出し時の細かいブレを抑制することとした。

b. 器

器は、円錐台形のカップ状とした。器の容積は、満杯にした場合でも砂が約2分ですべて落ちるよう50 ml程度と小さめにし、かつ大きさは、振り子の重りとしての存在感がある十分な大きさになるよう直径85 mm高さ100 mmにするため、器の形状には、壁面に大きく厚みを持たせるという上げ底的な工夫をした。3Dプリンタで出力し、使用感を確かめた。下部の穴を交換式とした（図6）。

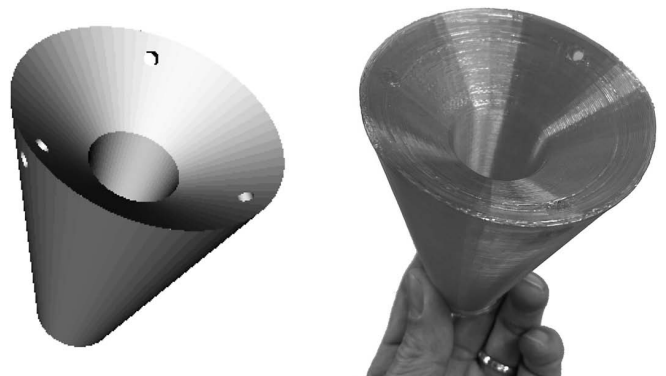


図6 器の試作。

c. 盤面（台）

盤面には、黒色の耐擦り傷性メラミン化粧板を採用した。ガード部は、高さを低く抑え幅を持たせ手すり状とし、色の白さと硬さと手触りの質感からナラの集成材を採用した。

砂を貯める溝（砂ポケット）は一か所だけとし、盤面の掃除が終わった時点で砂を集める場所であり、かつ、体験順番が明確に認識しやすくなるようにした。設置場所は、振り子のY字の面に対して45度の位置とし、側にカップ固定台を併設することで、振り子の最適なゆらし開始位置を自然にガイドできるようにした。カップ固定台にカップを置いて砂を入れることで、指で押さえなくても砂入れ中の砂落ちを防止できる。強い投げ出し防止のための射出機構付き固定台も考案したが、実験装置的な部品を取り付けるより見た目のシンプルさを優先し、可動部のない固定台のみとした。

バリアフリーの観点から、車椅子でも盤面の奥までアプローチして不自由なく体験できるように、盤面の下の土台の径を小さくし足下に空間を確保した。

土台部分に収納用扉の設置を検討したが、予算面から採用しなかった。

砂こぼれ対策として、台下の床面にフロアマットを設置することとした。

d. 砂

粒度分布と粒径と粒子の形状の違いによって、流下速度や落ちた後の線の描かれ方が変わるため、10種類以上の砂でテストし、顕微鏡写真で比較した結果、粒径がそろい、角の比較的取れている、長石が少なく色の白い砂を選んだ。これにより、描画時に散らばりにくく、粉が風に舞うことなく、かつ白線として美しく見えるようにした。

e. 砂掃除道具

車用ワイパー替えゴムを利用し、幅広い面を一度に快適に掃除できる掃除棒を考案した。ゴムは交換可能とした。器に砂を入れるのに、計量スプーンを使うこととした。

これらの検討結果について内部で評価を行い、まとめて仕様とした。

3.3. 製作

2020年4月に入札により業者選定を行い、有限会社サワダアートが落札した。台や天吊りフレームはほぼ仕様通りに製作した。

カップは、試作時には3Dプリンタにより出力したが、最終的には切削加工したケミカルウッドに塗装したものにした。砂の落ちる穴は、径を変更できるようにネジ回しで取り外し交換式とした。

固定台の上にカップをとどめておく方法は、固定台の上面に鉄を仕込みカップ底の穴の周囲に磁石を埋込むことで、磁石の吸着力によってカップを台上に留める方式とした。この方式により、移動防止柵が不要となりよりシンプルな形状の固定台とした（図7）。

天吊りフレームのロビー側柱設置場所が狭かったため、

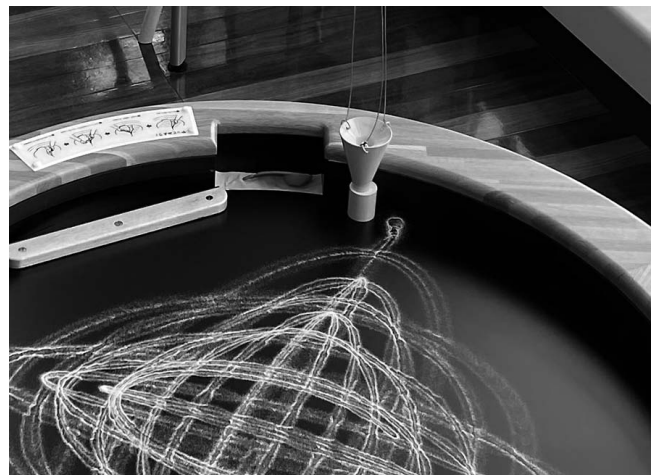


図7 製作したカップ固定台。



図8 製作した天吊りフレーム。

角柱の代わりに三角形の6mm厚鉄板に変更し、製作した(図8)。

盤面のスクラッチレス化粧板は、耐擦り傷性能があるとはいえ傷がつく可能性があり、ついた傷が目立つ恐れを減らすため、光沢ありから光沢無しに変更した。カップ衝突時の衝撃を軽減するため、黒色の低反発ウレタンフォームをガード部内壁に追加した。

製作した装置の諸元を表2に、完成した装置の外観を図9に示す。装置名は「振り子のサンドアート」とした。

4. まとめ

本稿では、装置を製作設置するまでの課程を報告した。

表2 当館装置の諸元表。

振り子	吊り方	吹き抜け部に設置した天吊り金具に固定したベアリングで支持したシャフトから
	全長	6 m (うちカップ接続部 900 mm)
	ワイヤー	φ2 mm (カップ接続部のみ 1.2 mm)
カップ (器)	形状	円錐台型
	直径	上面φ85 mm、下面φ30 mm
	高さ	115 mm
	砂の出る穴	φ1.7 mmとφ2 mm (先端部付替可能)
台	盤面形状	円形
	盤面直径	φ1200 mm
	盤面高さ	600 mm
	ガード部	盤面から高さ100 mm×盤面外周に幅130 mm
	砂ポケット (溝)	1 か所 (幅180 mm×奥行き60 mm×深さ15 mm)
	カップ固定 台	円柱φ45 mm×高さ55 mm
	カーペット	円形φ2200 mm
砂	粒径	約0.2 mm
	種類	珪砂 (オーストラリア産)
	1 回の量	15 mL (24 g)
	描画時間	1 分半～2 分
	掃除道具	車用ワイパー替えゴム加工品
	砂入れ	計量スプーン (15 mL)



図9 完成した装置の外観。

2020年8月1日に公開して以来、装置は予定通りの性能を発揮し多くの来館者に楽しんでいただいております。当初の目標は概ね達成できたと考えている。また、全長6mの振り子はリサーチ図形装置の中では、国内最大となった。

一方で、数多く使われる中で、想定されていたカップへの異物混入(髪の毛やホコリ、剥げた塗料片など)で砂が出なくなるトラブルはやはり発生し、ステージ外への砂のこぼれも頻繁に発生している。描画についても、課題としてあげていた器の細かいブレは抑制できたが、より大きな周期のブレで白線がうねってしまう現象が発生している。

原因は、強度を持たせるため太めのワイヤーや頑丈な

金具を採用したためヒモが重くなり、ヒモの中間部分で振動が発生しているためと思われる。また冬季には異物がないのに砂がカップから出なくなる現象など、当初想定していなかった不具合も発生している。これらの解決は道半ばであり、改善結果は改めて報告する。

5. 謝辞

本展示の製作に当たり、調査に協力いただいた、つくばエキスポセンター、新潟県立自然科学館、バンドー神戸青少年科学館、山口県立山口博物館、名古屋市科学館、京都市青少年科学センター、倉紡記念館、千葉市科学館の方々にお礼申し上げます。特に、視察に丁寧にご対応いただいたつくばエキスポセンターの松岡安希子氏と新潟県立自然科学館の近田梨絵氏には心より感謝申し上げます。

6. 引用文献

あすたむらんど, 2020. 宇宙と地球 展示物一覧, <https://www.asutamuland.jp/instit/bbsi.php?b=3104&c=5>. (2020年1月30日参照).

株式会社パイロットコーポレーション, 2007-03-15. リサージュ図形描画装置, 特開2007-62078.

長倉三郎・井口洋夫・江沢 洋・岩村 秀・佐藤文隆・久保亮五 (編), 1998. リサージュ図形. 岩波理化学辞典第5版, p. 1439. 岩波書店.

Pook, L. P., 2011 a. 3.4 Blackburn Pendulum. Understanding Pendulums: A Brief Introduction (History of Mechanism and Machine Science, 12), pp. 32-33. Springer.

Pook, L.P., 2011 b. 8.5.1 Lissajous Figures. Understanding Pendulums: A Brief Introduction (History of Mechanism and Machine Science, 12), pp. 116-118. Springer.

竹本憲司, 2017. 和歌山市立こども科学館, <https://www.wakayama-aba.jp/public/>和歌山市立こども科学館. (2020年1月30日参照).