

事業報告

サイエンスショー「ゆらゆらガタガタバランスワールド」実施報告

久松 洋 二*

A working report on “Center of mass and moment of inertia in balancing motions”

Yoji Hisamatsu

This paper reports the essential part of the demonstration to explain “Center of mass and moment of inertia” which was carried out as one of the science-show programs at the Ehime prefectural science museum. The topic we took as an example was “Balancing” which is closely related with the center of mass and the moment of inertia of a rigid body. In daily life, we often take balancing in cases of moving a rigid body or our own body without any specific attention. However it is usually hard for us to explain their motions on the basis of the physics laws, generally because the dynamics of rigid bodies is not taught at elementary and secondary schools. This demonstration was planned and exhibited for children and public to get them understand the motion of rigid bodies. This paper describes the outline of experiments and how to construct instruments in detail.

1. はじめに

あまり気にはしないが、人間は常に何かのバランスをとりながら生活している。例えば、体を支える、荷物を持つ、手を伸ばす、立つ、座るなど、体を動かす度に、無意識に、そして多くの場合かなり正確にバランスをとることができる。バランスをとる方法は、自然に身に付くことであり、また、学校教育で剛体の運動といった関連事項を学習する機会がないため、体系的に整理された知識として持つ人が少ない分野といえる。

このサイエンスショーでは、バランスをとるために人が無意識で行う動作、すなわち「うまく支えること」、「倒れたり落ちないようにすること」の2つを解説した。2つとも日常的な動作であるが、それらのことを力学で統一的に解説することが目的である。ショーの構成として、日常経験と照らし合わせることができる実験の製作を心掛けた。その中で、うまく支えるための場所や倒れないための行動といった、日常的な経験や運動の感覚を力学の考え方で説明した。説明に使用する力学法則を厳選し、少数にすることで、日常の経験則が単純な力学の知識で整理されることを示すように心がけた。

本稿は愛媛県総合科学博物館において、平成16年6月から9月の間に行われたサイエンスショー「ゆらゆらガタガタバランスワールド」の実施報告である。実験は1

回20分程度行われた。来館者一般が対象で、3ヶ月の間に約200回実演された。

2. 実験項目

- おきあがりこぼし
- 重心の探し方・重心による支持
- 体の動きと重心の関係
- 重心と支持の関係
- 平均台によるバランス
- 慣性モーメントと転倒
- 筒の上に乗る方法

3. 実験の構成と内容

このサイエンスショーでは、うまくバランスをとるために注目すべき物理的観点について、2つのことを紹介した。2つとは、支持する場所の選択と運動速度を減らす工夫である。すなわち、重心と慣性モーメントのことである。剛体の運動を考えれば2つは切り離せない概念であるが、ショーとしてはそれらの関連性に深く触れていない。そのかわり、支持されてバランスの良い静止状態と、バランスをとる過程で必要になる回転運動制御といった、静と動の対比として取り扱った。

剛体の力学は、高等学校までの学習で詳しく取り扱うことがなく、一般的にあまり知られていない知識と位置付けし、次の点を考慮している。定量的な議論または物

* 愛媛県総合科学博物館 学芸課 科学技術研究科
Dept. of Science and Technology Ehime Pref. Science Museum

理量の定義を扱うことはしない、各概念の関係性には深く触れない、重力下、すなわち地上での議論以外行わない、法則の一般性より日常的な体験と照らし合わせることを重要視することである。

また、ショーの実演風景は、愛媛県総合科学博物館ホームページにおいて「インターネット博物館講座」として動画で公開されている。

おきあがりこぼし

実験テーマが少し堅苦しく感じられることを防ぐための導入として、広告用の大きな風船型のおきあがりこぼしを使用した。主に子どもに思いきりたたいてもらって、風船を倒した。風船の底にある水袋がおもりとなって、倒れてもすぐに立ち上がる。

今回の実験で表現したいこと全てが入った運動であるが、その運動を解説することは避け、起き上がった状態が風船にとってバランスのいい姿であることを指摘するに留めた。

重心による支持

物体がバランス良く静止するとはどういうことを表す実験である。そのために、「重心」という言葉を導入して、キーワードと物体の動きを関連づけた。

実験としては、太さが場所によって違う1本の棒を用意し、いろんな場所で支持することで、質量中心が落下するか否かを確かめる方法をとった。好き勝手な場所で支持すると、ほとんどの場合、棒が落下するように回転するが、1か所だけ何の動きもしない場所がある。その場所が「重心」であり、重心で支えることで物体はバランス良く支持することができることを示した。このとき、重心で支持されたものは、自由に向きを変えられること、重心周りの回転はスムーズであることも同時に示し、重心が特別な場所であることを強調した。

また、望遠鏡の鏡筒のバランスをとる映像を用意し、重心で支持することにより、鏡筒を好きな角度に傾けて静止できることを解説した。

重心の探し方

物体の重心を探す方法を紹介して、見学者が実際に重心を探す実験である。実験に使用する物体は1次元、または2次元に近似できる棒と板に限定した。

棒の重心の探し方は、よく知られている¹⁾²⁾2本の伸ばした指の上に棒をおいて、指どうしを近づける方法を用いた。使用した棒は、太さが一定の丸木棒とバットの2種類である。

板は、発泡塩化ビニル板を任意の形に切り抜いたものを使用し、吊り下げたおもりと糸が教える板の重心の鉛直落下方向を数カ所からテストし、それらの交点から見

つける方法を使用した。この方法は少し時間がかかるため、見学者の状況によって割愛することも多かった。

また、次の実験の準備として、立った人のおおよその重心位置を画像で紹介した。

体の動きと重心の関係

重心が物体の中に入らない場合として、「く」の字型に張合わせた板材の重心位置を紹介し、板材の片端面で物体を支えようとしても倒れてうまくいかないことを示した。くの字型を支えるには、両端を同時に床に接する必要がある。重心はいつも物体の内部にあるわけではないことを示すとともに、日常経験で備わっている、物体の上手な支え方の知識を確認したところで、見学者の体を使った次の実験を行った。

実験は、椅子に姿勢よく座った状態、すなわち、背を伸ばして足を垂直に下ろした状態から、体を倒さずに背を伸ばしたままで立つことはできるか³⁾、といったものである。当館の実験ショーコーナーは見学用の長椅子が設置されているため、見学者はその場で姿勢を直すだけで実験に参加できる。ステージの上で、ショーの司会を行っている当館の展示案内員が、座る姿勢を実演して、その後、見学者と実験した。

両足の間の上に重心がないと立てないが、姿勢よく座っていると重心は足の間にないため立てない。そのために、椅子から立ち上がる時、足の間の上に重心がくるように体を前に倒したり足を後ろに引く動作を自然に行う。何気ない日常動作にも、重心に関係する合理的な説明があることを紹介し、物体を支持することは、支持する場所が重心であるか、支持する点を結んだ面内に重心があることを確認した。

重心と支持の関係

重心と支持の関係のまとめとして、クイズ形式で実験を行った。斜面に設置した3台の模型の車の上に、鉄のおもりをそれぞれ違う場所に取り付けておく。最初、車は倒れないように支えを取り付けておいて、支えをはずすと倒れる車はどれかを当てるクイズである。おもりは鉄製であり、模型の車はプラスチックで軽いことを強調した上で、見学者に予想してもらい、実際に実験して、タイヤの間に重心があるものだけが倒れないことを確かめた。

また、支える場所に重心があれば形は問わない例として、同じ形の矩形の板材を机の端に積み上げて、最上面の板材を机からはみ出させることが可能であることを実演した。

平均台によるバランス

この実験から、バランスをとる体の動きに注目する実験に話題が移る。まず、幅が18ミリの細い平均台を歩く実験を行った。見学者を一人指名して、平均台の端から端までゆっくり歩いてもらった。このとき、歩いている姿をビデオカメラで撮影した。平均台を歩き終わったら、録画した映像を再生して、バランスを崩したときに自然に行う手や足を広げる動作を行った瞬間を映し出し、この動作にも意味があることを指摘した。その意味の解説は次の実験終了後に行った。

また、バランスをとろうと努力している瞬間のポーズは、体をくの字に曲げる動作を伴うことが多く、それは重心を平均台の上に保とうとする動作であることも、映し出した映像を使って解説した。

慣性モーメントと転倒

おもりのついた棒の端点を手のひらで受けて、棒を倒さずにバランスをとる実験である。棒は2本用意し、1本は支える場所から遠いところにおもりを取り付け、もう1本は手元におもりを取り付けた。見学者2人を指名して、1本ずつ同時に実験してもらい、どちらが長く棒を倒さずにいられるかを競ってもらった。結果が出たら、2人の棒を取り替えて再度実験してもらい、2人にどちらが難しいか感想を答えてもらった。

慣性モーメントが大きいほど、倒れる角速度が小さいため、バランスをとる時間的な余裕ができる。そのため、遠くにおもりがある方がバランスをとりやすい。参加実験が終わった後、倒立させられる振り子を2本用意し、先の実験と同じ条件となるようにおもりをそれぞれ配置して、2本の振り子を同時に倒した。視覚的に倒れる速さが違うことを見せて、おもりの位置によってバランスのとりやすさが違うことを再度確認した。

その後、平均台の体験映像に戻って、人がバランスをとるときに出す手足は、慣性モーメントを大きくして、滞空時間を稼ぐ意味があることを解説した。

筒の上に乗る方法

最後に本実験のまとめとして、筒の上に板を敷き、その上に学芸員がバランスよく立つという、曲芸めいた実験を行った。体を支持するには、筒の上に重心がくる必要があること。落ちないように体を動かすとき、慣性モーメントを大きくする工夫をすれば、筒の上でも比較的簡単にバランスを保てること。これら2点を同時に見ることができ、慣性モーメントを大きくするために、先にステンレスのおもりをつけた、ステンレスのパイプを手にして実験を行った。

4. 実験機材と解説

今回の実験は、剛体の力学を直感的に捉えてもらうために、なるべく単純なつくりの装置を目指した。簡単で本質的な実験で、かつ、家庭でも追実験できるようなものや内容が装置に課せられた目標である。ショーとして見せるには装置の十分な大きさが必要になるが、今回のテーマにおいてはほとんど苦勞のない条件であった。大きいほど質量中心の位置精度の甘さが許され、慣性モーメントが大きくなるからである。

おきあがりこぼし(写真1)

広報用の高さ1600ミリ、直径500ミリ程度の風船で、当館の特別展示用に製作された広報アイテムの製作見本を使用した。底に水袋が入っており、かつ、底面が曲面で側面と連続に連結しているため、転倒しても重心の落下に伴う回転運動で、風船は起き上がる。大きさや起き上がる反応の良さから、大変人気のあった実験である。

この風船は、新規に製作すると6～8万円もする大変高価なアイテムである。また、水袋は衝撃に弱く、強い力で頻繁に倒されると、水袋が割けてしまって起き上がらなくなることが弱点である。ショーでは、3ヶ月の間ほぼ持ちこたえたが、終盤の1週間程度水袋が割けてしまい、起き上がる動作が遅くなってしまった。水袋の強度以外は、目立った問題はなかった。

重心位置を説明するための棒(写真2, 3)

幅85ミリ、長さ580ミリ、厚さ24ミリの板材を使用し、片端のみ長さ200ミリまでさらに2枚重ねた板材を用意した。重心の落下を見せるための穴と重心位置の穴を空けた。重心以外の穴に棒を差し込んで手を離すと、全体は回転運動を起こすが、重心の穴で支えると、静止したままで、回転させると滑らかに回転することを見せるものである。

指先で支えながら重心を見つける実験には、直径10ミリ、長さ1000ミリの丸木棒を使用した。

太さの違う棒の重心を調べる実験には、木製のバットを使用した。指先が揃った場所を吊り下げること、確かに重心であることを見せることを行った。太さが場所によって違う丸棒を素早く吊り下げするには、携帯電話を首からかけるためのストラップが保持力、操作性にとても優れていたため使用した。木製のバットは、指先で支えるには少し重いので、小さい子どもには不向きの実験であった。

重心位置を説明するための板材(写真4)

平面の重心を説明するための板材は、発泡塩化ビニル板で製作した。厚さ3ミリで、最大直径600ミリ程度で

ある．小口から10ミリ程度内側に多数の穴を開けて、千枚通しでおもりと一緒に吊り下げる．板材の重心は支えられた場所の真下で静止するため、板材と同時におもりを吊り下げれば、重心をとる直線が得られる．同じ操作をもう一度行えば、2本の直線の交点として重心位置が得られる．おもりは、釣り用の鉛、吊り下げるひもは、固い方が保持しやすいので3ミリ程度の導線を使用した．ひもの保持は、練り消しゴムタイプの展示用接着保持ゴムを使用した．

板材の種類は、雲形のもの、三角形のものを用意した．三角形を用意したのは、各辺の中線の交点が重心であることを説明するためである．棒の重心位置の類推と整合性があることが理解できる．しかし、時間や見学者の様子から割愛することがほとんどであった．

重心が物体の内部にない場合（写真5，6）

くの字型の板材を用意し、片端面だけでは支えることができない、すなわち倒れてしまうことを見せるための実験器具で、幅85ミリ、縦370ミリ、横280ミリ、厚さ24ミリの板材を使用した．重心位置は透明アクリルで説明できるようにした．

また、椅子に姿勢よく座り、背を伸ばしたままでは起き上がれないことを示す実験では、実際にショーの司会者が椅子の座り方を実演して説明を行った．

重心クイズ（写真7）

3台のプラスチック模型の車の上に、直径10ミリのボルトを取り付け、金属カラーを差し込んで製作した．金属カラーは鉄製で、見やすいように赤い布を貼付けて使用した．模型の車の大きさは幅120ミリ、長さ150ミリ、高さ100ミリである．12ミリの合板を利用して製作した斜面は約20度である．車を支える支持板は、アングルを使用した．クイズの内容は、ポール G .ヒューエット（1993）⁹⁾の演習問題を参考にした．

はみ出る板（写真8）

幅70ミリ、長さ150ミリ、厚さ15ミリのベークライトの板材を使用した．積み重ねていることを強調するために、2色の板を交互に重ねていった．ベークライトを選択した理由は、積み重ねる面がきれいな平面になるもので、適当な厚さが選択できて、かつ部材と切断の価格が安かったからである．同じ大きさのものが用意でき、平らな面が得られるものであればなんでもよい．5，6枚あれば1枚分はみだすことができ、積み重ねる時間がかからないので、1枚分はみだすことを実演した．また、あらかじめ2枚分はみだした実験を撮影しておき、画像で紹介した．家庭で実験するには、単行本などが適していることも解説しておいた．

平均台（写真9）

厚さ18ミリ、幅85ミリ、長さ1800ミリの板材を立てた平均台の上を歩く実験である．平均台の規格は図1に記す．足場が大変薄いため、最後まで歩き通すのはとても難しい平均台である．特に、実験では体験者にゆっくり歩くことをお願いしているため、途中で落ちる体験者が続出した．実験としては、落ちまいとする動きや落ちる寸前にとるバランスを保つ姿を撮影する必要があるために、難しいくらいの仕様が必要であった．しかしながら、しっかり手を横に伸ばして歩けば、2メートル程度ならばうまく歩くことができる．解説を終えた後に確認のデモンストレーションとして、学芸員が手足を伸ばして歩き通すことができることも見せた．

この平均台は、ショーの終了後に実験器具を自由に体験させる時間をもうけた際に、挑戦する人の姿が目立った器具の一つである．

バランス棒（写真10）

手のひらでバランスをとる棒を製作した．1メートルのステンレスパイプにステンレスのおもりを取り付けた2本の棒を用意した．パイプの片端には、金属球を溶接している．おもりは固定式で2本ある棒の内、1本は端に、もう1本は手元におもりがくるように配置した．おもりの周りには、綿とクッション付きの布を巻いて、落下事故に備えた．器具の規格は図2のとおり．

どちらの棒がバランスをとりやすいか予想してもらったが、案外手元におもりのある方が簡単だと答える人が多かった．実験は、2人の体験者をステージにあげて、1本ずつ同時に体験してもらい、次いで棒を入れ替えて再度体験してもらった．見学者はその姿を見て難しさを感じ取り、体験者に感想を尋ねることで、実験結果を確かめた．

振り子型実験機（写真11）

アルミニウムのカラーを取り付けたステンレスのパイプを倒立させて、回転落下させる実験である．パイプは2本並列に取り付けてあり、カラーの位置が回転軸に近いものと、もう一方は軸と反対側に設置してある．カラーには事故防止用にウレタンクッションとクッション付きの布を巻き付けた．装置自身が大型であるので、キャスター付きの台を製作した．装置の規格は図3のとおり．

2本のパイプを同時に倒すと、軸と反対側にカラーを取り付けたパイプの慣性モーメントが大きいため、目で見て明らかに倒れる速度が違うことが分かる．バランス棒を体験していない見学者に視覚的に説明するために行った実験である．

筒の上に乗る方法（写真12）

直径80ミリ，肉厚5ミリ，長さ400ミリのアクリルパイプの上に，幅400ミリ，厚さ12ミリ，長さ900ミリの木製パネルを敷いて，両端におもりを取り付けた棒を持ちながら板の上に乗る実験である．棒は直径25ミリ，長さ1820ミリのステンレスパイプにステンレスカラーを取り付けている．他の器具と同様に，クッション材（綿）とクッション付きの布を巻き付けて事故防止に努めた．

この実験は，練習しないと大変危険であるので，強い要望があっても見学者には体験させなかった．実演中は簡単に成功しない場面も多々あったが，最後の実験であることから，見学者の期待感をあおるには適当なものであった．

5.まとめ

剛体の力学という，少々専門的な話を題材にしたが，アンケート等による見学者の感想はまずまず好評であった．学校などで勉強する機会がない分野であるが，日常的な現象であり，体験的に実感しやすい内容であり，実験結果に多少なりとも意外性があったためと考えている．ショーでは，「重心」以外の専門用語は使用していない．回る場所，支える場所からのおもりの位置が遠いか近いかということだけで全ての説明を行った．重心と支える位置だけが物体を支える条件であることや，慣性モーメントの差が角速度に利いてくることは，見学者に意外性を与えることができたと感じられた．ショーの終了後に実験装置で確認の実験を行う見学者の姿が目立ったからである．

支える，バランスをとるということは日常的に行う，いわばあたりまえの行為である．あたりまえ故に，自分の行動の意味を深く追求したり，本質を抜き出して整理しなければならぬ場面が乏しい．そのため，よく知られている質点の力学の知識では説明できない，または一見逆の結果に見えることに気が付かない．簡単な実験や体を使った実験をとおして統一的に説明することで，その事実に気づき，意外性が生じるのである．

装置の安全対策としては，危険なもの，体験者の環境を整備できない，つまり十分なスペースや防具，クッションの壁などを整備できないものについては，見学者に体験させずに学芸員が行うことを基本においた．具体的には，振り子型実験機と筒に乗る実験である．振り子型実験機は現象の差異をはっきりさせる目的でおもりを重くしたため，見学者が参加できない装置になった．おもりにクッション材を巻き，万が一に備えた．筒に乗る実験は，本当に難しい実験なのかどうか確かめたがる見学者が多かった．実験して転倒した結果，体験者本人のみならず，手に持ったおもり付きの棒が周りを傷つける可

能性から体験を見送った．しかし，実験スペースと体験者の防具着用，順番待ちの人の整理，周りの観客の整理ができれば，ぜひ多くの人に体験してもらいたい実験の一つであった．その他の装置，器具については特に問題は感じなかった．

個々の器具の改良点としては，バランス棒が挙げられる．設計上，強度と軽量化の観点からステンレスパイプを選択した．しかし実際には，小さい子どもにとって重すぎて，うまく実験できなかった．小学生以上，それも体験者にある程度の体格を要求する必要性が生じた．更に，3ヶ月に渡る実験で金属パイプに曲げ変形が生じた．あらかじめ，数種類の実験器具セットを作っておいて，体験者の体格にあわせて選ぶ，または，折れれば差し換えるくらいの感覚で軽量化に努める必要があった．

参考文献

- 1) J.ウオーカー (1979): ハテ・なんだろうの物理学 1. 培風館. pp55
- 2) 愛知・岐阜物理サークル (1988): いきいき物理わくわく実験. 新生出版. pp82
- 3) ペレリマン (1987): ペレリマンの科学の家 おもしろい物理. 東京図書. pp23
- 4) ポール・G.ヒューエット (1993): 物理のコンセプト1 力と運動. 丸善. pp93
- 5) Raymond Bruman and the Exploratorium staff (1991): Exploratorium Cookbook 1. The Exploratorium. 82
- 6) Paul Doherty and Don Rathjen (1991): Exploratorium science snackbook. Exploratorium. Teacher Institute. 107
- 7) G.D.フレイヤー F.J.アンダーソン (1986): デモンストレーション物理. 大日本図書. 236
- 8) Robert Ehrlich (1995): 実験で楽しむ物理 1 ひとりでの回る生卵. 丸善. 126
- 9) K.ギップス (2000): ゆかいな物理実験: 朝倉書店. 270



写真1 おきあがりこぼし。
導入の実験に使用したもの。見学者が倒して起き上がる姿を観察した。

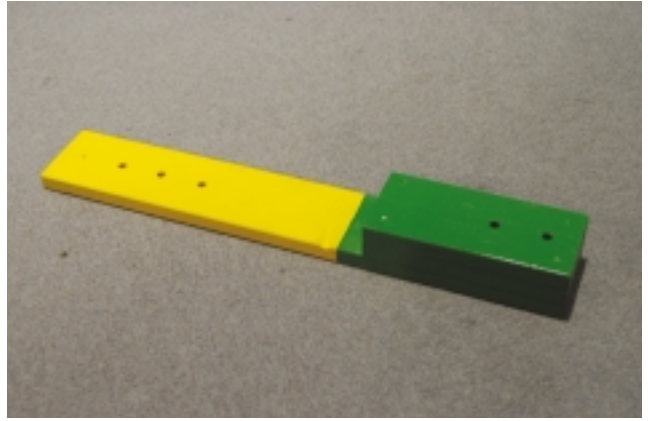


写真2 重心を解説するために使用した板材。
薄い場所と厚い場所にもそれぞれ数カ所の穴を空け、重心の落下も見せた。

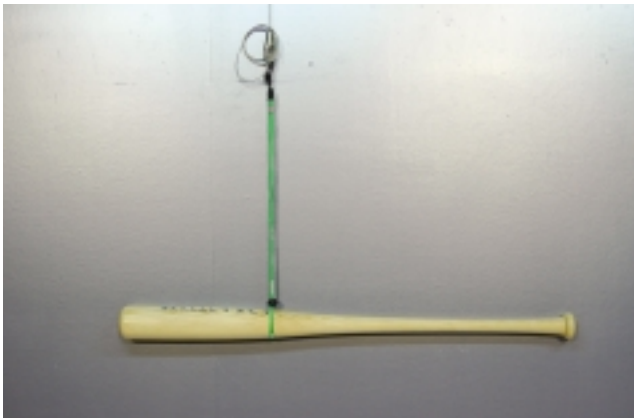


写真3 バットの重心。
首からぶら下げる携帯電話のストラップで重心位置を支持した。



写真4 平面の重心を探す方法。
発泡塩化ビニル板の周囲内側に穴を空けて、おもりと一緒に吊るす。

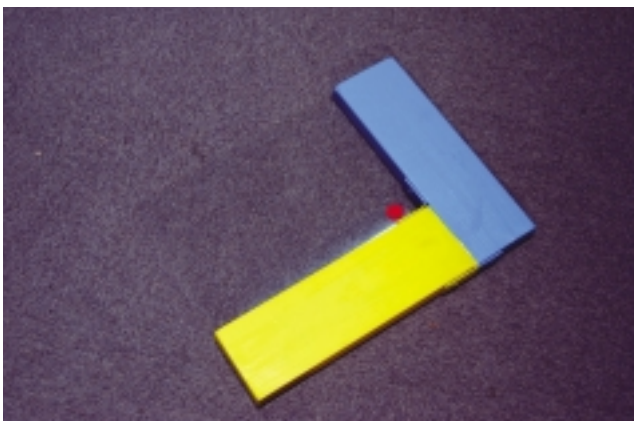


写真5 く字型の板材。
片端面で支えても、重心が支える位置にないので転倒する。重心位置は透明アクリル板で表示した。



写真6 椅子に座る姿勢。
司会の案内員による実演を例にして、観客席に座っている見学者全員で実験を行った。

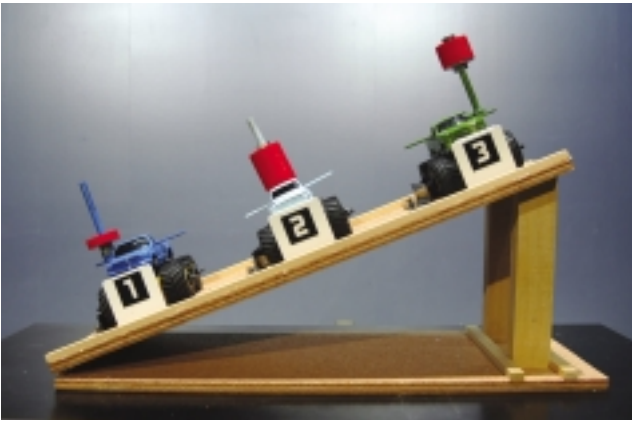


写真7 重心クイズ.

模型の車の上に金属のおもりを配置して、支えをはずすとき転倒する車はどれかあててもらおう.



写真8 はみ出る板.

支える位置と重心位置の関係を解説する実験. 同じ大きさのベークライトの板を使用した.



写真9 平均台.

渡る部分の厚みが18ミリと難しくしている. 体験している姿をビデオで撮影. バランスをとるポーズ, 落ちる瞬間を映し出して解説した.

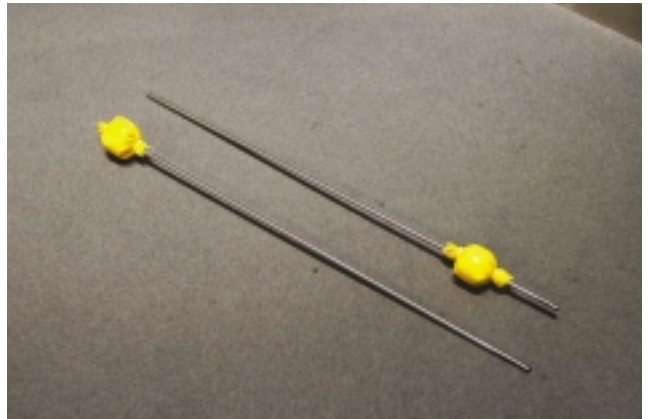


写真10 バランス棒.

手のひらで棒が倒れないようにバランスをとる. 手元と先におもりのある2種類の棒を, 2人に交代で体験してもらおう.

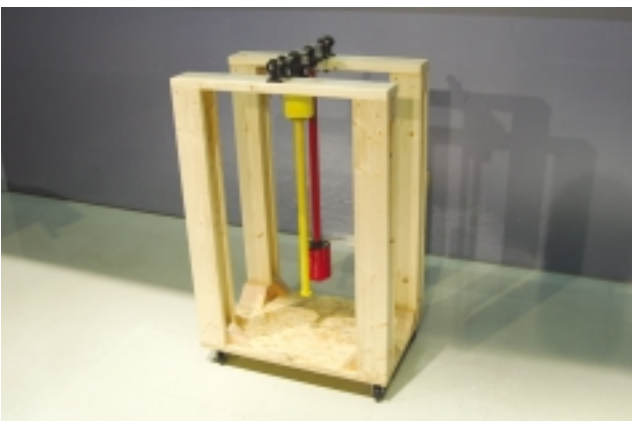


写真11 振り子型実験機.

おもりが軸に近いか遠いかで, 棒を真上から倒したときに回り落ちてくるはやすさが違う. バランス棒を体験していない見学者への視覚的な解説装置.



写真12 筒の上に乗る方法.

アクリルパイプの上に板を敷き, 両端におもりをつけた棒を持って板の上に乗ってバランスをとる. 棒の有る無しで難易度が違う.

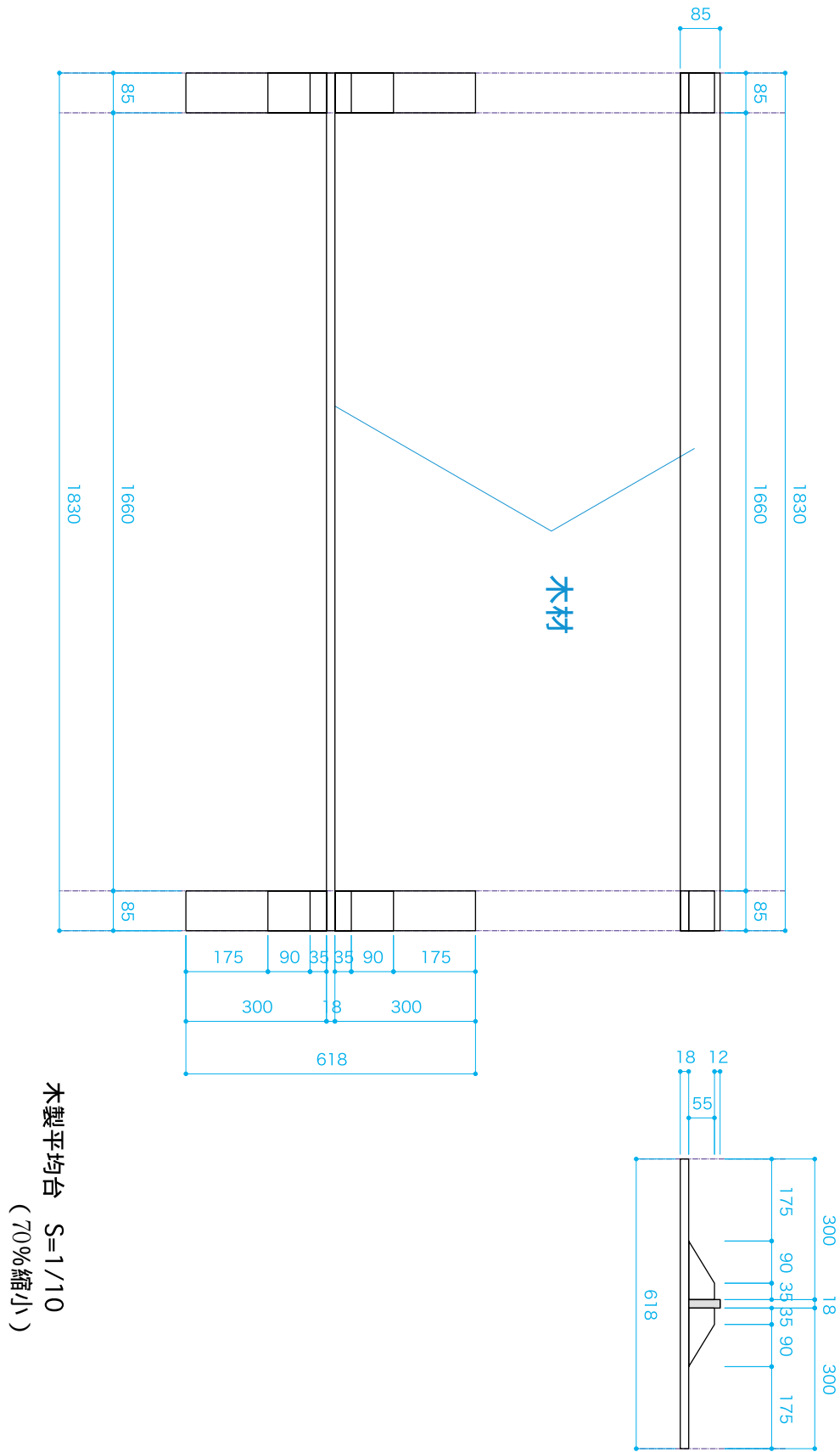
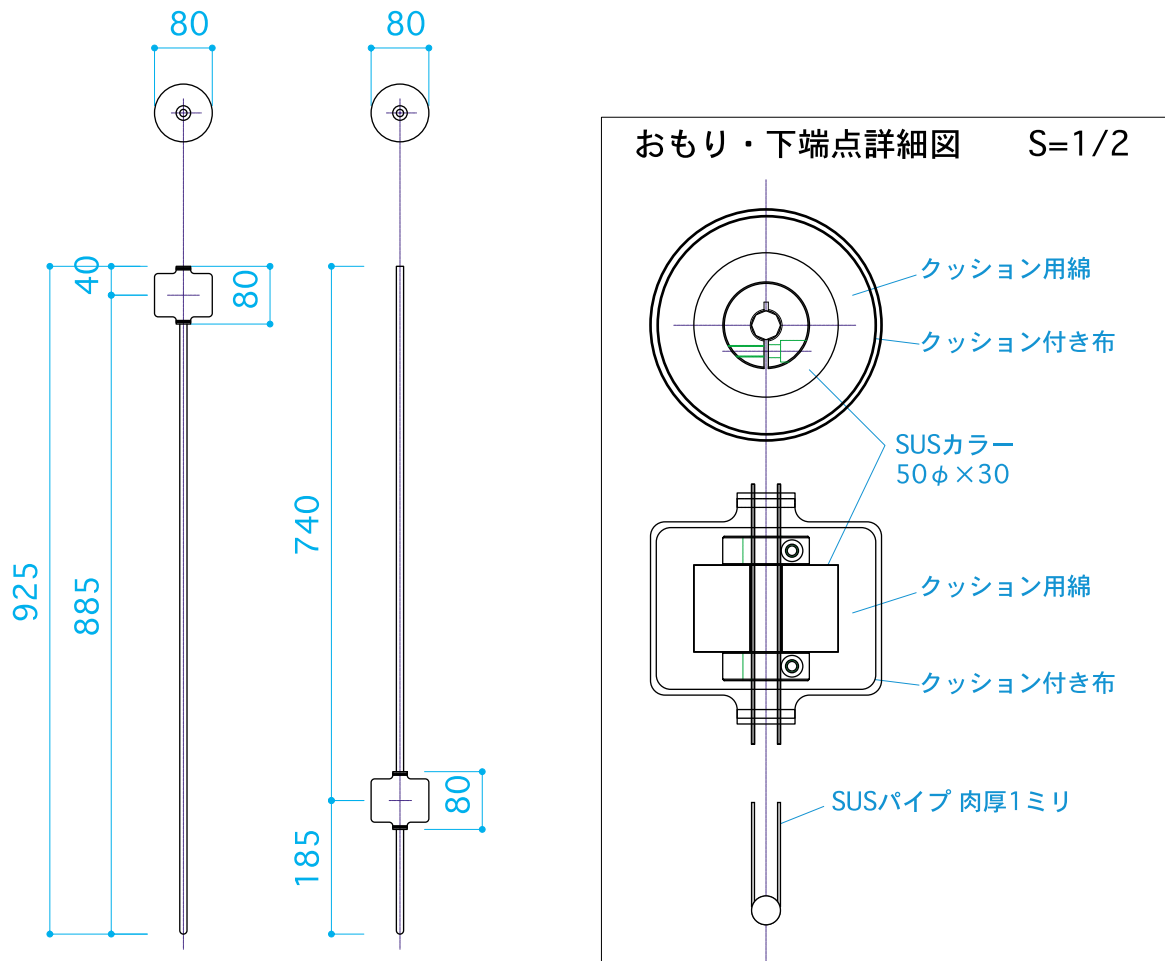


図1 平均台の規格.

木製：渡る長さは、定尺の板材をそのまま使うことで決めたが、結果的に数歩で渡れることが実験時間として適当であった。



バランス棒 2種 S=1/10

図2 バランス棒の規格.

棒とおもりはステンレス製、おもりのクッションには綿を使用した.

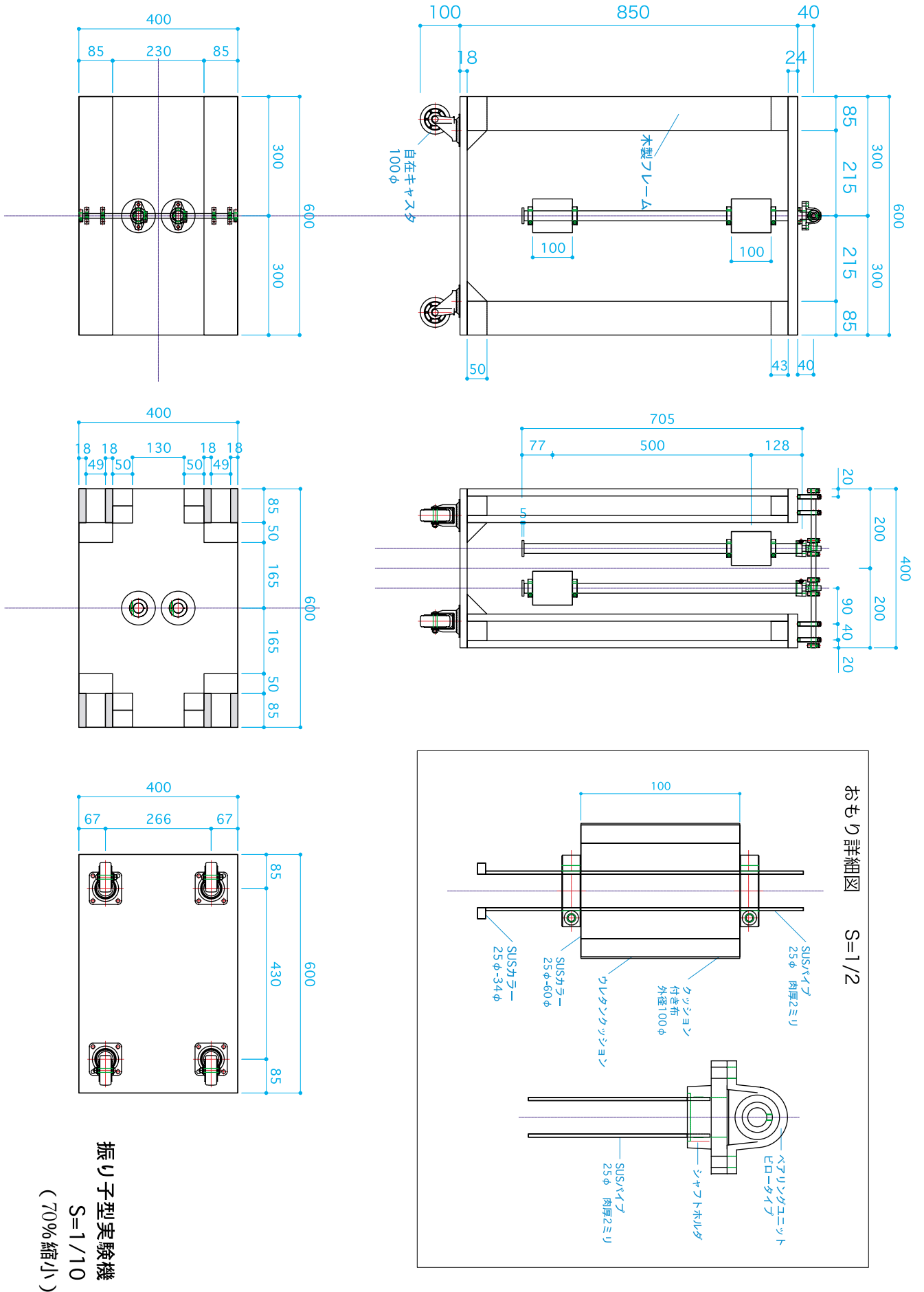


図3 振り子型実験機の規格。棒とおもりはステンレス製。