

レゴブロックを使った科学教育展示機器の開発

高 重 正 明¹ 山 口 俊 久¹

Study of Science Education Apparatuses using the LEGO Block

Masaaki TAKASHIGE¹ and Toshihisa YAMAGUCHI¹

The present article describes two science education apparatuses using the LEGO block. One is a model of atomic force microscope (AFM), which is one of the most useful tools in the study of surface science. Another is a model of superconducting magnetic-levitated railway system, which is an application to the magnetic flux pinning effect of the type II superconductor.

キーワード：物理教育，原子間力顕微鏡，超伝導磁気浮上，レゴブロック

Keywords : physics education, atomic force microscope, superconducting magnetic levitation, LEGO block

1. はじめに

先端的な科学や技術を、研究者自身が親しみやすく紹介することにより、若い世代の科学技術への関心を喚起することの重要性が強調されるようになってからもう久しい。研究者の中には、ちょっとした試みで一時的に面白さを喚起しても結局持続できずに無意味だという意見の方もいると思うが、筆者らは本業の物性物理学の研究に関係した現象や実験装置を、広く一般に紹介するような活動を永く行ってきた。

現在までに筆者らが扱ってきたテーマには、「超伝導磁気浮上懸垂走行」^(1,2)、「原子間力顕微鏡の模型」⁽²⁾、「圧電効果の簡単な観察法」⁽³⁾などがあり、各方面に公表している。最近でも修士論文や卒業研究の課題として、時折、そのようなテーマで学生諸君には活動してもらっている。このような活動において苦勞することは、何か既成の研究機器を組み合わせるだけで実験系を構成するというだけでなく、電子回路、金属加工、ガラス細工など雑多な作業が伴うというか、ほとんど雑多な作業ばかりだということである。

ところが昨今の学生諸君でこのような作業に慣れている方は極めて稀である。一番いいのは筆者自らが手を動かして模範を示せばいいのであるが、年齢による能力低下で、なかなか手先が器用には動かないということも多い。また外注に出すといっても、昨今は、ちょっとしたことをやってくれるような外注先を見つけることは容易ではない。結局のところ、そういうテーマには、はかばかしい進展は望めないというのが現状であろう。

今年の卒業研究でも、そのような話をしつつテーマを学

生達と相談していたが、レゴブロックを使ってみたらどうかですかという提案が学生側からあった。レゴブロックなら子供の頃から馴染んでいるので、細々とした工作をせずに行うことができるのではないかということであった。

そこで今年のテーマとして、筆者らが関わってきた実際の研究分野から以下の2つを選んだ。まず一つは、表面科学の実験手法として今日代表的な研究装置である原子間力顕微鏡を取り上げ、この原理が一般にも分かるような模型を作ること、もう一つは、超伝導磁気浮上走行装置を取り上げ、超伝導体の冷却方法に工夫を加えて走行時間を大幅に増加させるような装置を作ることである。

早速それに取り組んできたが、半年ほどかけて最近、それぞれの装置がほぼ動き出した。まだ完全に完成したわけではなく、改良していかなければならない点も多々あるが、本稿ではその概要について紹介したい。

2. レゴブロックとは

レゴブロックについてはご存知の方も多いと思うが、簡単に説明しておく。これはデンマークのレゴという玩具会社の製品であり、プラスチック製のブロック(積み木)の一種である。ブロックの上面はいくつかの円状突起(直径 4.8 mm 程度)が 8 mm 程度の中心間隔で並んでおり、底部にはそれが入る空洞があり、子供の手の力でも差し込んでブロック同士を結合したり外したりできるようなものである。

ブロック 1 個の寸法や形状にはいろいろのものがあ、積み重ねることで様々な形態のものを作り出すことができる。色も数種類ある。昔は純粋に子供用の積み木であったが、1960 年台以後、急速に世界中に普及して、ブロック形

状以外の車輪や歯車、モータ、センサ等の部品も多く発売され、可動模型も作り出すことができるようになった。さらに1990年台にはモータやセンサを制御する独自のソフトウェアも出現し、現在ではより高度に進化して、レゴブロックを利用した科学教育の試みには、非常に広範囲なものがある。

したがって、ここでやっていることは特にユニークなことではないが、原子間力顕微鏡や超伝導浮上走行というテーマに対してレゴブロックを使った模型を製作するということは、初めての試みではないかと思っている。

3. 原子間力顕微鏡の模型製作

原子間力顕微鏡(Atomic Force Microscope、AFM)とは、原子レベルで物質表面を観察する装置であり、原理は以下の通りである。物質表面に鋭い針を近づけると、針の先端の原子と物質の表面原子の間には原子間力という力が働く。

図1のように、針はカンチレバーというたわみやすい材料でできた部品の先端にあり、その背面で光を反射させる。針からの原子間力によるカンチレバーのたわみを、反射光の方向変化でとらえてその大きさを間接的に検知する。針を一定の高さにして物質表面を走査すると、表面との距離や表面の原子の種類により原子間力が変化するので、それを表面座標の情報として記録すれば、表面形状を観察できることになる。これが原子間力顕微鏡の原理である。

この種類の顕微鏡の起源は、1981年にIBMチューリヒ研究所のG. Binnig(ビニツヒ)とH. Rohrer(ローラ)によって発明された走査型トンネル顕微鏡(Scanning Tunnel Microscope、STM)に始まる。AFMも1985年にBinnigらにより発明されたものであるが、現在では非常に多くの種類がある⁽⁴⁾。

今日、図1の針やカンチレバーの部分は、STMのトンネル電流はもとより、原子間力以外の電気力、磁気力、弾性力など、様々な物性を検知できるように、その都度付け替えられるようなプローブ(探針)という部品になっており、このような方式の装置を走査プローブ顕微鏡(Scanning Probe Microscope、SPM)と呼び、表面科学研究にはなくてはならない装置となっている。

本研究の目的は、この種の装置の模型を作ることである。必ずしも現実に使われているものではなく、原子間力のような力を検知して物質表面の情報を明示していく仕組みが一目瞭然となるような模型を作りたいということである。

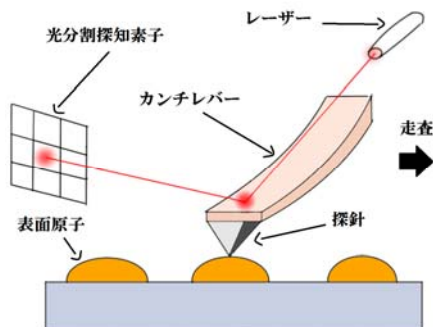


図1 原子間力顕微鏡の原理

そこで、AFMによる測定様式の1つであるタッピング方式として、図1のカンチレバーの部分の板バネにしてバネの先端が外力を受けた時に、その振動が変化する様子が見られるような装置を作ることにした(図2参照)。カンチレバーの振動はモータの回転により刺激を与え強制的に振動させる。原子間力と見做す力は、針の部分に小さな永久磁石を張り付けて、物質表面に相当するものとして平面上に何種類かの永久磁石を置き、それらの間のクーロン吸引力や反発力によって発生させることにした。

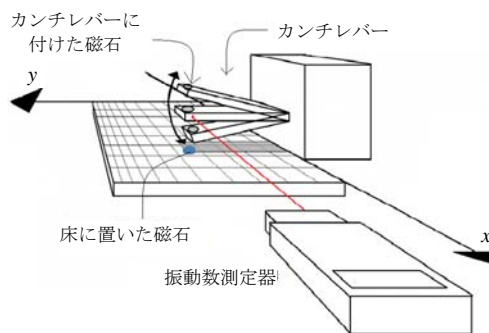


図2 AFM模型の概略

平面上を、カンチレバーを振動させながら水平に動かしていき、その時の振動数や振幅の変化を見ることができれば、AFM類似の模型と見做せるわけである。

ここで、板バネの振動子がこのような力を受ける時に物理的にどのようなことが起きているかを明確しておこう。図3は、小さい磁石(質量 m)を先端につけた板バネが微小振動している時、振動の平衡点から距離 R だけ離れた平面のところに力の源になる別の磁石が置かれた場合を示している。そのような磁石がない場合の微小振動のバネの運動方程式は、バネ定数を k として

$$F = -kx \quad (1)$$

であるが、平面上の磁石から距離 R の2乗に反比例するようなクーロン力が加わると

$$F = -kx + A/(R+x)^2 \quad (2)$$

のような式になる。ここで $A > 0$ にとると板バネの先端の磁石は反発力、 $A < 0$ で吸引力を感じる。ここで(2)を $R \gg x$ として、近似すると

$$F = -(k + 2A/R^3)x + A/R^2 \quad (3)$$

となる。

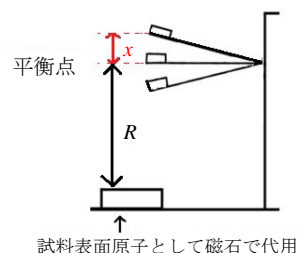


図3 カンチレバーの振動

(3)式の第 1 項が意味するところは、平面の磁石からカンチレバーが力を受けるとバネ定数 k が変化して角振動数が $\sqrt{k/m}$ から $\sqrt{(k + 2A/R^3)/m}$ へと変わるといことである。また第 2 項は、そのような力を受けることにより振動の平衡点もずれるということである。すなわち、 $A > 0$ では振動数は高くなり平衡点は上にずれ、 $A < 0$ では振動数は低くなり平衡点は下にずれる。以上のカンチレバーの振動の様子は、図 4 のように模式的に表すことができる。

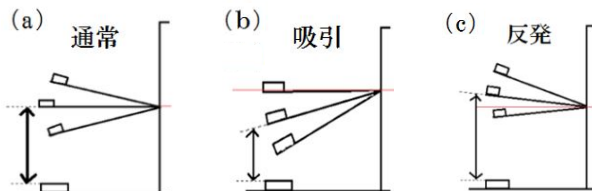


図 4 カンチレバーの振動の様子

以上の考察に基づき、レゴブロックで作った装置の全景写真を図 5 に示す。白い平面に規則的に配列したものが表面原子と見立てた永久磁石である。右上の赤いアーム状の部品の下で (a) で示した部分でカンチレバーが振動しているが、この写真でははっきりしない。左下で、(b) で示した装置 (ParadoxX 非接触レーザーデジタルタコメータ MODEL DT-2234C+) により、カンチレバーの振動数を測っている。

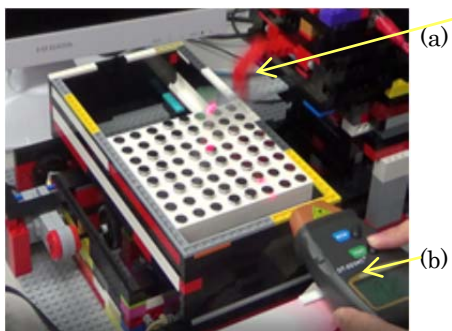
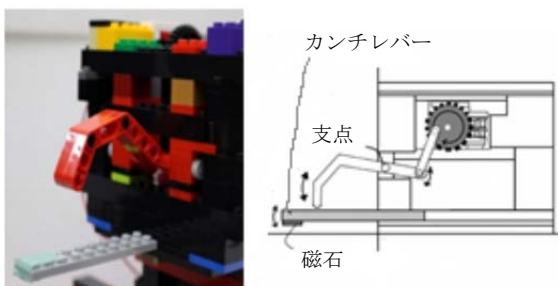


図 5 AFM 模型の全体像

カンチレバーの部分拡大したのが図 6 (a) の写真である。背後のブロックの中にはモータ (タミヤ プラズマダッシュ T15186) があり、その回転数をギアで適切に落として、クランク機構により赤いアームを往復運動させる。図 6 (b)



(a) カンチレバーの写真 (b) カンチレバーの動作原理
図 6 カンチレバーの模型

はその原理を表した模式図である。

この往復運動で赤いアームの下の灰色の板状 (約 13 cm、重さ 2.8 g) のブロックで作ったカンチレバーに上部から打撃を与える。この衝撃でカンチレバーには数 10 Hz の振動が発生する。カンチレバーの先端の裏側には、丸いネオジウム磁石 (表面磁束密度、約 0.27 T、重さ 0.6 g) が貼り付けてある。

図 7 は物質の表面と見立てた部分を拡大した写真であり、図 8 はその模式図である。まず図 7 であるが、白く見えるのはブロックで作った大きさが 13×13 cm 程度のステージであり、その上に 8×8=64 個の丸いネオジウム磁石を配列してある。その配列は図 8 に例として示したが、磁石の厚みを変えたり磁極を反転したりして、発生する力に変化を持たせている。表面磁束密度の分布は ±0.6 T の範囲であり、カンチレバーと表面との距離は通常時で約 2.7 cm である。

なお、このステージの下には、モータやラック・ピニオン機構が組み込まれており、水平面内 x, y 方向に動かすことができるようになっている。これにはマインドストーム EV3 というレゴの制御機構を使って、指定の場所に動かすことができるようにしている。PC からの制御も可能になっている。

このようにカンチレバーを水平に動かすのではなく物質の載ったステージを動かして走査をするという仕組みになっている。これは現実の SPM でも同様であり、試料を載せたステージを動かして試料表面の走査を行うことは普通のことである。



図 7 物質表面の模型 (写真)

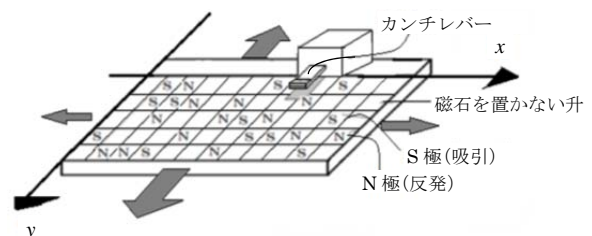


図 8 物質表面の模型 (模式図)

次の図 9 はカンチレバーを振動させながら、表面の模型上を移動して、振動の様子が変わる時の写真である。動画でないので、明瞭というわけではないが、(a) が、表面の磁石がない時、(b) が引力を受けている時、(c) が反発力を受けている時である。小さくて見難いかもしれないが、図 4 に

示した振動状態の模式図を各写真の左上に貼り付けてあるので併せて見ていただきたい。

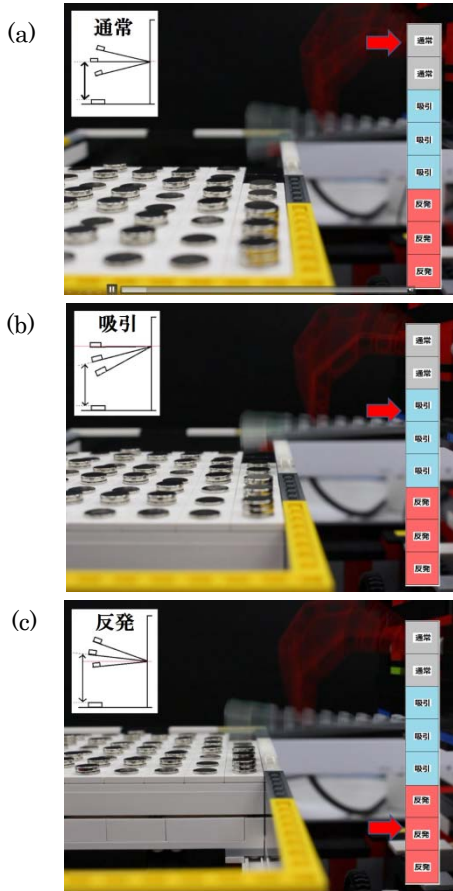


図9 カンチレバーの振動の変化の様子

以上のようにカンチレバーの振動状態の変化を観察できたが、定量的なパラメータとして何を記録して表面を画像化するかが問題である。実際の SPM でも多くの方法があるが、ここでは単純に振動数を記録した。適当に磁石を配列した表面に対して、図5のデジタルタコメータにより、カンチレバーの振動数を手動で測定してみた。

振動数変化は予想通りで、力が働いていない時が約 50 Hz 程度であり、吸引と反発力の程度に応じて 30 ~ 65 Hz に分布した。標準の 50 Hz からの増減を、黄色(反発)と赤(吸引)とした棒グラフを図 10 に示した。なお高さのスケールはタコメータの表示値 (rpm、4 桁) そのものを使い描いている。

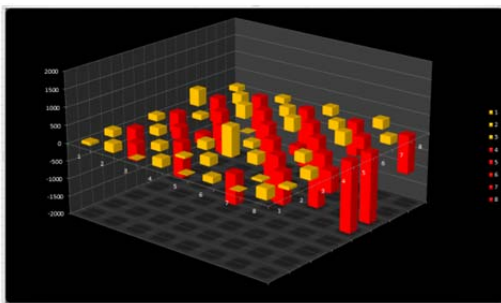


図10 カンチレバー振動数変化の平面分布

このようなデータは棒グラフではなく、明度を変えたような鳥瞰図で示すことが実際の SPM の結果では行われているが、今回はそこまで準備できなかった。

今後の課題としては、振動数の自動取り込みをおこなうこと、振動数を座標上にプロットするのではなく、振動数が変化しないように高さ方向の調節機構を付けることである。その高さ方向の移動距離を座標上にプロットすれば、ほぼ実際の SPM と同じような機能を持つことになる。

4. 超伝導磁気浮上鉄道の製作

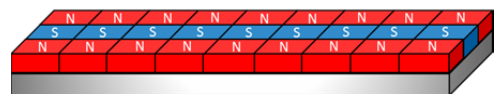
超伝導とは物質を冷却すると、ある温度(超伝導臨界温度)以下で、電気抵抗が突然 0 になることで発見された現象である。この他にもいくつか有名な性質があるが、比較的一般に知られている性質は、永久磁石の上で超伝導体が浮上する性質である。

図 11 は N 極と S 極がチェッカーボード模様になるように配置したネオジム組磁石上で、液体窒素で冷却した超伝導体が浮かんでいるシーンである。



図11 超伝導体の永久磁石上での浮上

磁石の組み方を一工夫すると、より面白い現象を見ることができる。図 12 (a) は磁場分布が横方向に均一になるように永久磁石を軌道状に配列したものである。図 12 (b) のように、その軌道上に超伝導体(発泡スチロール膜で包んである)を載せると紙面左右の方向に、一見、何の摩擦も無いように運動させることができる。これは多くの人達にとって、非常に不思議な印象を与えるので、超伝導という現象の存在に興味を持ってもらうという上では効果的である。



(a) 組磁石軌道



(b) 浮上中の超伝導体

図12 均一磁場を持つ組磁石軌道の上に浮かぶ超伝導体

このような現象は、マイスナー効果や磁束のピン止め効果と呼ばれる事柄に関係しているが、物理的なことは既に昨年度の本紀要⁽⁵⁾で説明してあるので参照いただきたい。

本稿は、このような浮上現象を利用した列車模型を、レゴブロックを大いに活用して製作したことを報告するのが目的である。

上述したように、超伝導体を磁気軌道上でほとんど抵抗なく動かすことができるので、その軌道の敷設の仕方を工夫して鉄道模型のジオラマと同じような楽しみ方ができる。実はピン止め効果という現象を応用すると、軌道上で浮上走行するだけでなく、軌道にぶら下がった背面走行も可能である。筆者らはそのようなジオラマをもう 20 数年前から研究の合間に作り、オープンキャンパスなどにも展示してきた。図 13 に示したものはその 1 つである。これは図 12(a)と同じく 3 列のネオジム磁石軌道を曲げて作ったもので、総延長は約 6.7 m、高低差は最大で 0.27 m、カーブの曲率半径は最少で 0.24 m である。



図 13 超伝導磁気浮上走行のジオラマの例

このような超伝導走行で一番面倒なことは、超伝導性は冷却しなければ発現しないということである。使用する超伝導体は、たいていは臨界温度が 90 K 級のイットリウム系酸化物超伝導体 ($YBa_2Cu_3O_{7-y}$ 、このままではなくピン止めを強化した特別な組成を使う) であるので、液体窒素 (沸点 77 K) を冷媒として使う。

例えば、図 11 のような裸の超伝導体の場合、浮上が見られる時間は、冷却した超伝導体を磁石に載せてから、長くても数秒間、図 12 (b) のように断熱材で包んで低温を保持できるようにした場合で 1 分間程度である。筆者らの経験では、液体窒素を溜めた小型の断熱材の箱の中に超伝導体を入れるなど相当な工夫をしても、図 13 のようなジオラマを連続走行できる時間は、2, 3 分程度である。なお、図 14 に図 12 (b) で浮上しているような走行体の構造を示しておく。

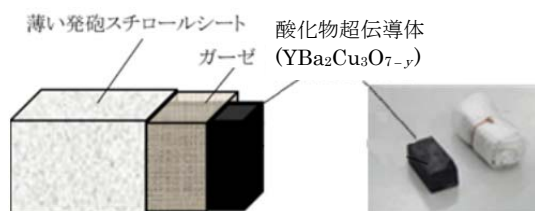


図 14 断熱した走行体の構造の例

筆者らも連続走行ができる時間をできるだけ延ばすために、様々な試みをしてきたが未だに成功していない。そこで、このたび、レゴブロックを使い走行時間を延ばす試みに挑戦したわけである。今回行ったことは、周回磁気軌道の一部をできるだけ低い位置に敷設して、その部分に液体窒素を充たして、その中へ走行体を通過させ冷却するという試みである。

図 15 に製作した磁気軌道の全景の写真を示した。これは図 12 の場合と同じくネオジム磁石の 3 列の軌道で作ったものであるが、総延長約 8.5 m を周回して元に戻ってくるが、途中 3 回のらせんループを回るようになっている。高低差は約 0.2 m、カーブの曲率半径は 0.15 ~ 0.3 m 程度である。

写真の手前正面に白い発泡スチロールケースが見えるが、その中に液体窒素を溜める。同時にその中を磁石軌道も通っている。その部分の拡大写真が図 16 である。

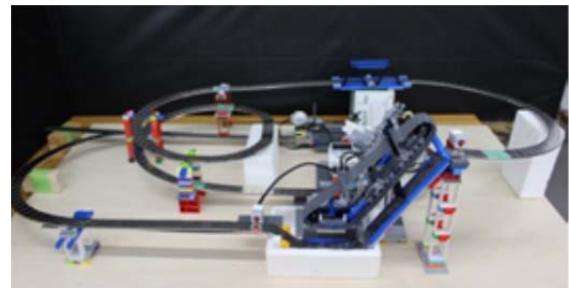


図 15 レゴブロックを使った周回軌道

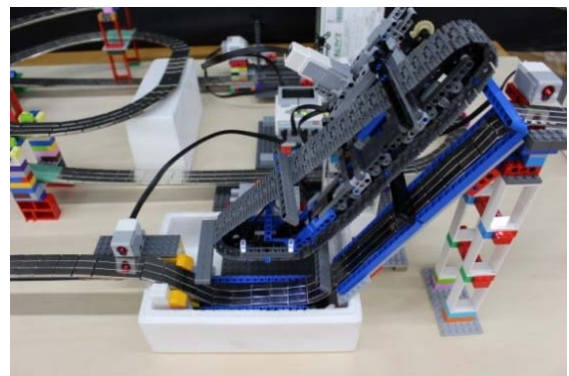


図 16 冷却装置の拡大写真

図 16 において、走行体は左から右に走行してくる。図から分かるように磁気軌道は発泡スチロールケースの中に下り坂になって入り、約 10 cm 程度平坦になっていて、ここに液体窒素が溜まっている。そこから右に 27 cm 程度の長さの斜面を登り、高さにして約 20 cm 上がる。そこが上記した周回軌道の最高点であり、走行体はそこまで持ち上げられた後、重力により滑って連続的に周回する。

冷却部に入った走行体は、軌道上部に平行に設置されているベルト状のものに渡されている 6 本の横棒の 1 つに引っ掛けられて移動する。このベルトは輪になっており、紙面に向かって反時計回りに回転している。これはレゴブロックの製品の 1 つのクレーンの模型 (Crawler crane) のキャタ

ピラ(全長 73 cm)を転用したものである。走行体の出入りはセンサでキャッチされ、ベルトが適切な位置で待機、始動できるようにマインドストーム EV3 を使い制御されている。最後に、図 17 に走行体の動きを記録した動画から切り

抜いた写真を 4 枚示した。

まず(a)は全景である。左下の隅に、赤い矢印で示したように、ちょうどカーブを回ろうとしている走行体が写っている。(b)では、その走行体が冷却装置の液体窒素を溜めた平坦な部分を移動しており、(c)では坂道をベルトに渡された横棒に押されて走行体が登っており、(d)は最高点に到達した瞬間である。なおこの間、磁気軌道と走行体は常に無接触である。

このようにして、超伝導状態の長時間持続と位置のエネルギーを利用した連続的な周回走行が可能となった。まだ名人芸的な部分も残っており調整は必要であるが、すでに 50 分程度の連続走行が可能になっており、大きな進展をしたと筆者らは感じている。

5. 終わりに

以上のようにレゴブロックを使って 2 つの科学展示装置を作ってみた。動きを見せることが目的であるために、このような文章や静止画だけの説明では、趣旨が十分伝わらなかったところがあるかもしれないが、興味ある運動を見せるという点では目的を達成したと思っている。ただ、まだ荒削りであり、それぞれの模型ともに物理学として定量的な考察がまだ十分なされていないので、今後補っていき

たい。本研究のテーマは筆者の一人(MT) が与えたものであるが、後は学生諸君だけで企画して進めたものである。本年度の研究に参加した学生は、岡邊耕平、橋本直樹、米澤匠君をはじめ、普久原啓太、川杉翔吾、杉村堯彦、村上快人、若林誠、原谷亮太君である。その努力に心より敬意を表したい。

また、大学院生の勝呂吏湖さん、伊東賢吾君には、この研究を常に側面から見守っていただいたことに、そして、実習指導員の飯塚礼子さん、日比野由美さんには、部品の調達や実験室の借用など、様々なお世話をいただくとともに、研究面でもご助言をいただいたことに、心よりお礼を申し上げたい。

参考文献

- (1) 例えば、高重正明、鈴木晴彦、田沼誠一：「超伝導と磁石で遊ぶ」、*固体物理*, **26**, p.461-465 (1991)など。
- (2) M. Takashige, S-I. Hamazaki and H. Suzuki: "Frontier Technology and Physics Education –Topics from High Temperature Superconductivity and Atomic Force Microscope–", Proc. 2nd Japan-China Symposium on Physics Experiment Education in Universities, Aug.22-24, 2000, Waseda University, pp1-6. (2000).
- (3) M. Takashige, F. Shimizu and S-I. Hamazaki: "Simple Experiment of Piezoelectric Signal Observation using Ferroelectric Crystals", Proc. 3rd Japan-China Symposium on Physics Experiment Education in Universities, Aug.21-24, 2002, Nanjin Southeast University, pp112-115. (2002).
- (4) 例えば、高重正明、濱崎真一：「走査プローブ顕微鏡による強誘電体・強弾性体の表面観察」、*固体物理*, **35**, p.681-688 (2000)など。
- (5) 高重正明、勝呂吏湖、橋本明美、山口俊久：「超伝導磁気浮上走行体の速度測定」、*明星大学理工学部研究紀要*, **52**, pp.5-12. (2016).

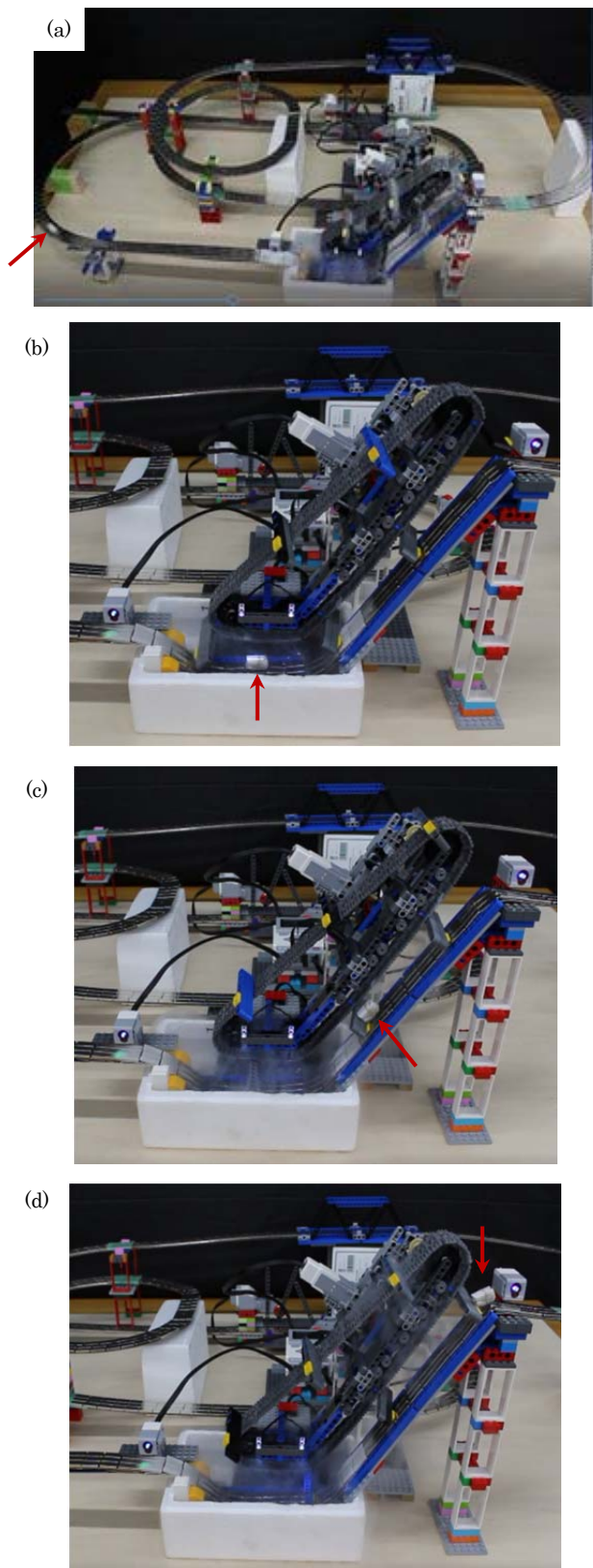


図 17 走行中の超伝導体