

とやまと自然

第40卷夏の号

No.158 2017

とくべつてん
《特別展》

「不思議まるわかり！空気があるから」 2017/7/15～9/3

てんじかいせつ
展示解説



とくべつてん
▲特別展のマスコットキャラクター「オバケのくーきん」

てん じ かいせつ
展示解説とくべつてん
特別展「不思議まるわかり！空気があるから」

市川 真史（富山市科学博物館 物理担当）

「空気のような存在」と言われるとおりに、日頃はあまり意識されることはありませんが、「空気」は常に身の回りにおいて、不思議な現象を引き起こしています。重たい飛行機が空を飛んだり、蜃気楼が見えたり、青くない山が遠くからは青く見えたりといったことは、実は空気があるから起こる現象です。

富山市科学博物館では、平成29年7月15日（土）～9月3日（日）に、特別展「不思議まるわかり！空気があるから」を開催し、実は「空気があるから」起きる不思議な現象を、20を超える実験・体験装置で説明します。以下では、特別展で紹介する空気の働きを「空気で見える」「空気が動く」「空気が満タン」「空気がお押し」の4つのテーマにわけて解説します。

I 空気で見える（空気による光学現象）

近くを見ても空気は見えませんが、遠くを見ると空気の影響が見えてきます。

■空気が作る空の色

空気は無色透明に思えますが、太陽の光を浴びた空気は、わずかに青色に光っています。ただその光はとても弱いので、すぐ近くでは見ることはできません。晴れた空を見上げたときのように、たくさんの空気からのわずかな光が重なりあって強まることで、はっきりとした青色に見えるようになります。

空気が光るのは、電球のように自ら光を出す

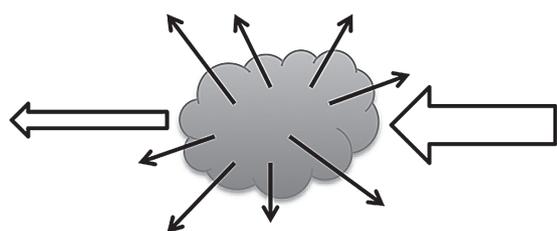


図1 光の散乱の様子。入ってきた光の一部をいろんな方向にはね返す。

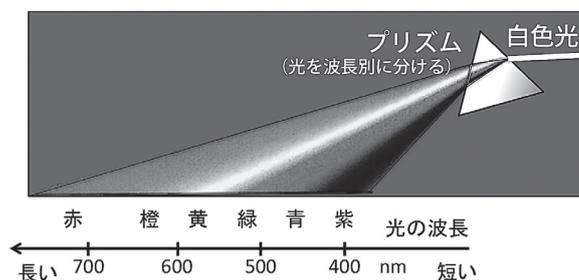


図2 白い光の成分

のではなく、太陽の光を空気が散乱するからです（図1）。

太陽からの光は、赤、黄、緑、青など、波長の異なる様々な色の光がバランスよく混ざることによって、人間の目に白く見えています（図2）。空気は、窒素や酸素など小さな「分子」という粒でできていて（表1）、粒の大きさは光の波長よりずっと小さく、波長の短い光ほどよく散乱します（表2）。つまり空気は青い光を多く散乱し、緑、黄と波長が長くなるにつれて散乱が少なくなり、赤い光は散乱しにくくなります。青色（波長430nm）の散乱の多さは、赤色（波長760nm）の約10倍です。空気に散乱された青い光は進行方向からそれて、四方八方へ広がります。これが太陽の光を浴びた空気が青く光る理由です。そのため、夜は空気が光らず、夜の空は青くないのです。（正確には、月明かりでも空気は青く光ります。とても弱くて目には見えませんが、星空の写真を撮ると分かります。）また、散乱されやすい青い光でもその頻度は低いので、遠くで散乱された光が目には届く

表1 空気（大気）の成分と重量比

空気分子（合計100%）	その他（空気分子に対し）
窒素（75.53%）	水：水蒸気、水滴（霧や雲粒など）（1～3%）
酸素（23.14%）	チリ：土埃、煙粒子、
アルゴン（1.28%）	海塩粒子、黄砂、火山
その他分子（0.05%）	灰など（ 10^{-7} ～ 10^{-5} ）

表2 大気成分による散乱の比較

散乱物質	空気分子	すいてき水滴、チリ
散乱名	レイリー散乱	ミー散乱
散乱具合	青散乱、赤透過	白(全色散乱)
散乱場所	地上～20km	地上～1~2km
散乱物質の大きさ	小さい (光の波長の10分の1以下)	大きい (光の波長と同じ～数10倍程度)
散乱物質の分量	変わらない	変わる

までの途中で何度も散乱されて、地上まで届かない、ということもあります。ちょうど良いくらいの空気の濃さなのです。

ここで、一つ疑問がでできます。空の青色を空気を作るのであれば、空気分子の分量は常に変わらないので、空の色はいつも同じはずです。確かに、時刻によって空の色が変わるのは太陽の動きが原因ですが、同じ場所同じ時刻でも日によって空の色は異なります。これはなぜでしょうか。実は、大気中には、空気分子の他に、その量が常に変わる水やチリが含まれているのです(表1)。水は大気中に1～3%存在し、通常は気体状態である水蒸気として、多いと液体状態の霧や雲粒として漂っています。チリの成分は土埃や海塩粒子、火山灰など様々で、その量もその時々で変化します。共通するのは、空気分子よりも粒のサイズが大きいことです。そのため空気分子と異なり、どの色の光も同じように散乱します。結果として、白い光が来たら雲粒やチリが散乱する光は白く、青い光が来たら散乱する光も青く、赤い光なら散乱光も赤いのです。雲粒やチリが大気中に存在する量は、空気分子に比べて大変少ないのですが、効率よく光を散乱するので、少しの量の変化でも、散乱具合が大きく変わります。典型的なのは雲粒が沢山集まった「雲」で、雲は白く光っています。この雲中でも水の割合は大気中の重量比で3%程度です。そして雲は刻一刻と姿を変えています。雲ほど濃密に集まっていなくても大気中に雲粒やチリは存在し、大気の下層の地上付近、約1～2kmに多くあります。それ

より上空にはほとんどありませんので、地上から真上を見上げた場合にはこれらの影響は少なく青い空が見えますが、斜め横を見ると雲粒やチリの層を長く通るので、白さが加減が増えていきます。つまり、空の色は真上から地平線に近づくほど青色に白の混ざる割合が多くなり、かすんだ水色になるのです。高い山へ行くと、雲粒やチリの影響が減るので、白い散乱光が減り、青さが際立つ空となります。平地でも、乾燥してチリの少ない空のきれいな日には、抜けるような青い空が広がることがあります。

では、散乱されずまっすぐ進んだ光はどう変わるのでしょうか？バランスよく混じって白色だった光から、青色成分が多く抜けていき、結果として黄色や赤色の成分が多く残ります。昼間の太陽の光は、大気として存在する空気を上から通り抜け、比較的短い距離しか通らないので、白色から黄色に見えます。一方で、夕方の太陽は、大気を横から通り抜け、昼間より25倍ほど長い距離を通るので(図3)、青色成分がより多く抜けて、結果としてオレンジから赤色に見えます。



図3 大気中を光が通る距離

ここで、また一つ疑問がでできます。光が赤くなるのは、白い光から青色成分が抜けて直進してきた光だけ、つまり丸い太陽本体だけのはず。ところが、夕方の赤い太陽の周りには、同じく赤い夕焼け空が広がっています。夕焼け空の赤色はどこから来るのでしょうか？この原因も大気中の雲粒やチリです。夕方には太陽からは赤い光が届くので、雲粒やチリが散乱する光も赤色です。ただし、散乱する方向に偏りがあり、太陽光と同じ向きが多く反対向きは少ないので、結果として空全体は赤くならず夕日の周りの空だけが赤く染まるのです。

山の青さを考えてみましょう。良く晴れた日に遠くの山が青く見えるのは、青空と同じ、空気の色なのです。遠くの山ほど手前にたくさんの空気があり、青い光が強くなる一方で、山の木々や岩から出る光は弱くなるので、手前の空気の光が勝り青く見えます。特に日かげの斜面から出る光はもともと弱いので、より青く見えます。しかし、雪山の白い斜面は光を強く反射するので、空気の青い光よりも強く届き白いままで見えるため、雪山は、日なたが白く、日かげは青く見えるのです。こうして考えると、山の青色は、手前の空気の色、ということになります。富山きときと空港から見える山々の青色を考えると、剣岳は上市町を50%立山町を27%富山市を23%通った空気の色、大汝山は立山町75%富山市25%、薬師岳は富山市の空気の色100%、といえますね(図4)。

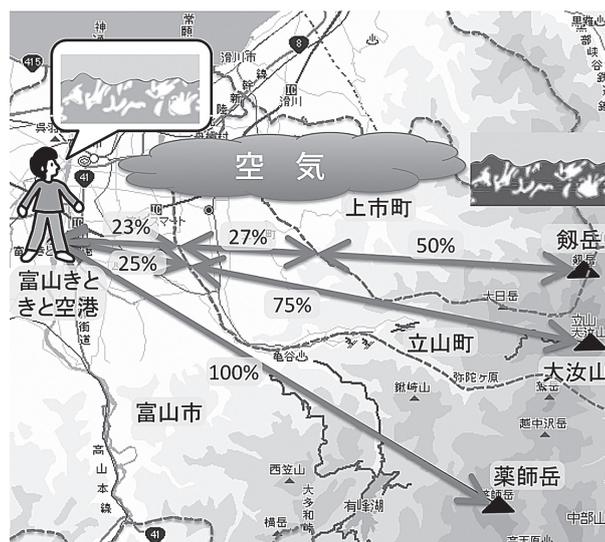


図4 富山きときと空港からみた山の青色

■空気で変わる蜃気楼の姿

空気は、レンズのように光を曲げることもあります。例えば、空気中から水面に斜めに光が差したとき、水面のところで光は下向きに折れ曲がって進みます。これは、水中の光の速度が空気中より遅いため、その境界で光が曲がるのです。同様のことが、空気中でも起こります。

空気中の光の速度は真空中とほぼ同じですが、全く同じではありません。15℃の空気中では真空中に比べて、0.028%ほど遅くなります。さらに、空気の密度が大きくなるとそれに

応じて光の速度は遅くなります。空気の密度は気圧が同じなら温度が下がると大きくなるので、空気の温度が下がると光の速度は遅くなります。つまり、異なる温度の空気が接するところでは、それぞれの空気中の光の速度が異なるため、その境界で光が曲がるのです。ただし、水中と空気中の光の速度差は25%程度あり水面では光は大きく曲がりますが、常温付近で空気の温度が5℃異なる場合の速度差は0.0005%程度しかなく、光の曲がる角度はとてもわずかです。



図5 船が反転して見えた上位蜃気楼

蜃気楼とは、温度が異なる空気層の境界を光が通過することで曲がり、遠方の景色が伸びたり縮んだり、反転して見えたりする現象です。上層が温かく下層が冷たい場合は「上位蜃気楼」、その逆は「下位蜃気楼」と分類されます。

下位蜃気楼は年間を通じて比較的頻繁に見られ、夏の暑い日にアスファルト道路上でみられる「逃げ水」現象も下位蜃気楼と同じ原理の現象です。暖かい空気層は地表や海面上のわずか数cm～数十cmの高さにだけ存在します。

上位蜃気楼は変化が大きく頻度が少ない珍しい現象です。このときは暖気層と冷気層の温度差は1～4℃程度、温度境界層の厚みは数m程度なので、光の曲がる角度は小さいですが、数km～十数km先の景色を見ることで長い距離を光が進むので、目に見える変化が現れます。

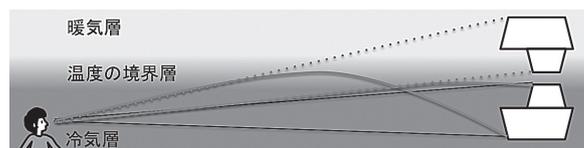


図6 上位蜃気楼の見え方

このような特殊な温度環境になる原因について、これまで立山連峰からの冷たい雪解け水が富山湾に流れ込むことで海面付近の空気が冷やされて上暖下冷の空気層ができるとされていま

したが、近年では陸上の暖気が海上に流れ込んでくることで上暖下冷になるとの説が有力です。

II 空気が動く（空気の流動振動による現象）

日頃空気の存在を感じることはありませんが、空気が動くとその存在に気づくことができます。例えば、空気が流れると風として、振動すると音として感じます。

■風

圧力の高い状態の空気と低い状態の空気が接しているとき、圧力の高い側から低い方へ空気が流れます。これが風です。風船に空気をいれて膨らませた状態を想像するとよいでしょう。この場合、風船中の空気の圧力は周りの空気よりも高くなっています。風船の口を開けると、中の空気が勢いよく吹き出てきます。そして風船が縮んで中と周りの圧力が同じになると、空気の流れは止まります。このように、気圧に差があると、圧力が均等になるように高気圧から低気圧へと空気が動くことで風がおき、気圧が均一になると風はやみます。

水面を風が吹くと、空気が水をこすり小さなさざ波ができます。水面の上をさらに風が吹き続けると波は次第に大きくなり、海でよく見る波となります。このように海の波は風によって作られていて、「風波」と呼ばれ、地震によってできる津波や台風で生じる高波などと区別されています。海にいつも波があるのは、海の上をいつも風が吹いているからです。

■対流

対流は、温度差のある空気どうしが接している場合にできる空気の流れです。温かくて軽い空気が上に浮き、冷たく重い空気が下に沈みます。気圧差で生じる風が気圧を均一にするように、対流は温度を均一にする働きがあります。例えば部屋の隅にストーブを設置したら、暖められた空気が天井まで上昇し、部屋の反対側の天井で冷やされて下降して再びストーブに向か

うという循環する流れができることで、部屋全体が暖められます。地球規模でも対流によって赤道付近の熱が北極や南極方面に運ばれることで、全体として地球がおだやかな温度環境になる働きをしています。

■音

音は空気のふるえです。音源の連続的なふるえる動きが空気を押し引きし、空気の圧力の変化として伝わっていきます。

空気が減ると圧力が小さくなるので、音の力も小さく弱くなりますが、ふるえる速さは変わらないので、音の高さや伝わる速度は変わりません。空気が無くなると、音は伝わりません。

III 空気が満タン（空気密度に依存する現象）

日頃空気の重さは感じませんが、空気にも重さがあります。その重さは、 1m^3 で約 1.2kg です。このような重さを持つ空気が、地上のあらゆる所に満たされていて、私たちはその中で活動しています。いわば、空気の海の底で暮らしているのです。

■空気抵抗

ものが空気中を動くとき、空気を押しのけながら動く必要があります。空気には重さがあるので、その空気を動かすためには力が必要です。これがものの動きを妨げる「空気抵抗」となります。もののサイズが大きいほど空気抵抗は比例して大きくなるので、同じ重さでも小石と羽根では、羽根の方が空気抵抗が大きく、同時に落ととしても羽根の方がゆっくり落ちます。

ものの動く速度が増加すると空気抵抗も大きくなります。その影響はサイズより大きく、速度の二乗に比例します。雲の中で出来た雨粒は重力の力で落下しながら加速しますが、加速するほど空気抵抗も大きくなるので、ある速度まで達すると重力と空気抵抗の大きさが等しくなり、それ以上は加速しなくなります。そのため、雨粒の大きさにより最終的に到達する速度（終端速度）は決まっています、小粒の雨

(直径 0.5mm) で毎秒 2m、普通の雨粒 (直径 2mm) で毎秒 7m、大粒の雨 (直径 5mm) で毎秒 10m 程度です。さらに雨粒が大きくなって直径 8mm を超えるあたりから、空気抵抗の力で雨粒の形が大きく変形してつぶれ、分裂してしまうため、それ以上の速度の雨粒は落ちてきません。このおかげで、雨粒は高いところから落ちてきますが、あたっても痛くはないのです。さらに高いところ、宇宙からやってくる流星や隕石も、大気とぶつかることで加熱されて光って燃え尽きたり、減速されます。おかげで、空気の無い月のようにクレーターだらけの地表にならずにすみます。(地表にクレーターが少ないのは、風化や植生の影響もあります。)

■飛ぶ

飛行機は翼に空気を受けることで飛ぶための上向きの力を得ているので、空気がなければ飛べません。鳥や虫やヘリコプターも同じです。標高の高いところでは空気が薄くなり、翼に受ける空気からの力は弱まるので、上向きの力は小さくなります。飛行機の場合は飛ぶスピードを上げることで翼に受ける力を補えますが、ヘリコプターでは回転翼の回転数を上げるのには限界があるので、飛行機に比べ高所の飛行は難しくなります。ホバリングしながらエサをとるハチドリにとっても空気密度が薄くなるほどより速く羽ばたかなければならないため、高所に住むハチドリはエサの取り方を工夫し飛行時間が最小となるようにしているそうです。

■変化球

野球やサッカーのボールを回転させると、飛んでいく方向が変化します。ボールの進む向きと回転方向が同じ面では、空気の流れが遅くなるので圧力が高くなり、反対の面では低くなり、この圧力差で曲がります。これはマグナス効果と呼ばれています。ビーチボールや卓球など、軽いボールの場合は特によく曲がります。空気が薄く密度が小さいと空気抵抗が減って球速は上がりますが、圧力も弱まりますので回転によ

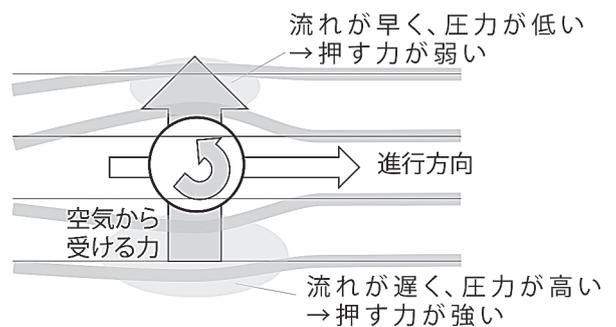


図7 変化球のマグナス効果

る変化が減少します。

■浮力

ヘリウム風船が浮かぶのは、周りの空気がヘリウムガスよりも重いからです。ヘリウムの密度は空気の14%ほどです。空気の押し上げる力とヘリウムの重さによる下向きの力との差86%がヘリウムを浮かせる力となっています。周りがヘリウムより軽い水素ガスで満たされている場合は、ヘリウム風船は沈みます。

熱気球は空気を暖めることで周りの空気より密度を小さくし、軽くすることで浮く力を得ています。

■冷房

暖房効果を得るのは簡単です。灯油やガスを燃やしたり電気を流すなど、エネルギーを消費することで熱を発生させれば温かくできます。一方、冷房は簡単ではありません。人類が火を使い始めたのは100万年ほど前といわれていますが、機械で冷やす技術が実用化されてきたのはわずか200年ほど前からです。その前は天然の氷を寒い地域から温かい地域に運び冷房・冷却に使っていました。米国ボストンの氷ははるばる日本まで運ばれていた時代もありました。

ものを冷やすには、熱を取り去るしか方法がありません。取り去るにはヒートポンプを使い、取り去った熱はどこかに捨てなければなりません。エアコンでは、外の空気中に熱を捨てることで冷気を作っています。空気がなければ手近に熱を捨てる場所が無くなり、冷房はさらに

困難なものとなります。宇宙では空気の対流で熱を排出することが出来ないのです、国際宇宙ステーションでは、内部で発生した熱を排出するために、巨大な放熱板を使って宇宙空間に放射で熱を放出しています。

■山に登ると寒くなる

山に登ると寒くなるのは、標高が高くなるにつれて気圧が低くなり、空気が膨張して薄くなるからです。もし空気がなければ、山の上でも平地でも、温度はほとんど変わりません。(ただし、日かげと日なたの温度差が大変大きくなります。)

IV 空気が押す (大気圧による現象)

意識することはありませんが、私たちの体はいつもかなり強い力で空気から押されています。1気圧というその大きさは10 cm × 10cmの広さで100kgにもなります。1 m³で約1.2kgの重さがある空気が上空10km以上にわたって積み重なっているためです。人や動物の体はその力に耐えられるように出来ています。ちょうど水中の魚にとって水圧が気にならないのと同じでしょう。手のひらほどの広さに100kgなんて、すごく重そうに思えますが、手の反対側にも同じ100kgの力がかかるので重くはありません。

■吸盤

吸盤は、窓ガラスやタイル壁などのつるつるな面に皿形のゴムを押しつけることでくっつきます。押しつけて壁とゴムの間の空気を抜くと、ゴムが元の皿形に戻ろうとして広がるため、中の空気の圧力が小さくなります。外側は大気圧のままなので、この内部と外側の気圧差で吸着します。内部の空気を抜くほど吸着力は強くなりますが、内部が真空となって圧力がゼロになっても、大気圧以上の力で吸着することはありません。吸盤の吸着力は吸盤が大きければ大きいほど強いこととなります。原理的には、10cm × 10cmの吸盤は100kgを支える力があ

りますが、接触面からの空気漏れや実際の接触面積などから実際はもっと小さくなります。プッチンプリンが逆さまにしても落ちないのも吸盤と同じ仕組みで、大気圧が支えています。プッチンすることで内部に空気が入り圧力差が無くなるので、プリンの重さで落ちてきます。

■手押しポンプやストロー

手押しポンプは、レバーで水中のピストンを上下させつつ、二つの逆流防止弁で水の流れを一方通行にすることで、水をくみ上げます。ピストンを引き上げると、手押しポンプ内の圧力が下がるので、井戸の水面にかかっている大気圧によって水がパイプ内に押し上げられ、手押しポンプ内へと水が導入されます。ピストンを動かすことでつくられる手押しポンプ内の低圧と大気圧の差で水は引き上げられるので、大気圧以上に水を引き上げることはできません。大気圧は水深10mの水圧と同じ大きさなので、水をくみ上げられる限界は10mとなります。電動ポンプであっても上限は同じです。また、高い山に行くと大気圧が下がるので、くみ上げられる限界の深さが減ります。ストローで水を吸うときも同じ仕組みです。もし長いストローを用意すれば、原理的には10mの高さまで吸

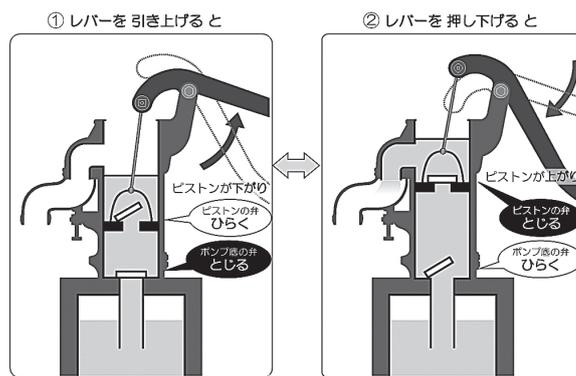


図8 手押しポンプの仕組み

い上げることができます。

吸盤も手押しポンプも、真空の力で引きつけている、という感じがしますが、真空の力とは内部の低圧と大気圧の押し合う力の差が原因です。大気圧以上の力になることはありません。いわば、真空は受け身の力なのです。

■水が100℃で沸騰

水を熱すると100℃で沸騰します。沸騰をミクロに見ると、液体としてゆるやかにつながっていた水分子の動きが激しくなり、水の内部から水分子単独で気体として空中に出て行くようになった状態です。通常の温度でも水分子は水面から空中に出て行きますが、沸騰時よりずっと少なく、この状態は蒸発と呼ばれます。なぜ少ないかというと、出て行く力が大気圧より弱いからです。温度が上昇し、出て行く力が大気圧より強くなると、次々に水分子が空中に出て行き、沸騰という状態になります。そのため、大気圧が大きくなれば水分子はなかなか出て行けず沸騰する温度が上昇し、小さくなれば低い温度で沸騰します。立山の室堂平の大気圧は約760hPa、平地の約3/4の大きさで、水は約92℃で沸騰します。水が何℃で沸騰するかを決めているのは大気圧なのです。

V おわりに

空気は地球表面の薄っぺらい場所に存在するだけで、宇宙の中では当たり前前の存在ではありません。ここに挙げた様々な不思議は、実は地球だけで起こることなのです。このことは世の中の現象を科学的に理解するのにきっと役に立つはずですよ。

身の回りで不思議な現象に接したとき、「気のせいかな?」と思ったら、代わりに「空気のせいかも?」と考えてみれば、案外当たっているかもしれませんよ。

平成29年度 特別展

「不思議まるわかり! 空気があるから」

開催期間: 7月15日(土)~9月3日(日)

場所: 富山市科学博物館 2階特別展示室

※特別展観覧料(100円)と入館料が必要です。

(高校生以下は無料)

主催: 富山市科学博物館

VI 展示の紹介

エントランス

空気ロボット「オバケのくーきん」と
「クロネコのみーにゃん」他1体

I 空気で見える(空気による光学現象)

青空と夕日再現装置

山の青さ再現装置

蜃気楼発生装置

蜃気楼の光路可視化装置

II 空気が動く(空気の流動振動による現象)

空気砲(小型)

空気砲(大型)

風チューブ(フウチューブ)

逆さ浮かんで止まるボール

風速計に挑戦

風による造波装置

空気台車

音の共鳴でミラーボールが揺れる

音の伝達の空気密度による違い

回り灯籠

III 空気が満タン(空気密度に依存する現象)

気圧変化に伴う揚力の変化体験

気圧変化に伴う羽の落下速度比較

涼しい部屋と暑い外

雨つぶダンス

回転によるボール軌跡の変化

ヘリウム風船が浮かぶ

IV 空気が押す(大気圧による現象)

吸盤ぶら下がり体験装置

手押しポンプの透明模型

真空バズーカ

減圧すると湯温変わらず沸騰する

エピソード

宇宙から見た地球大気「空気は地球の表面だけにある」