



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	物理学エッセイ : 文系のための物理学2021
Author(s)	文系のための物理学2021受講生; 川本, 思心//編
Issue Date	2022-02-08
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/84044">https://hdl.handle.net/2115/84044</a>
Type	article
File Information	PhysicsEssays_BunButsu2021.pdf



# 物理学エッセイ



文系のための物理学2021



物理学エッセイ

文系のための物理学2021

## 序文

本書は、北海道大学の文系向け学部授業「文系のための物理学」の受講生 21 名によるエッセイ集である。テーマは日常の光景を物理学で解きほぐしてみた作品から、経験的理解を超える世界の小解説、そして物理学そのものを扱った考察まで多岐にわたる。しかしどれもその中心には、「自分なりの理解」を試みた軌跡がある。

物理学を扱ったエッセイ・随筆は古今東西に存在する。寺田寅彦、その門下であり本学縁の中谷宇吉郎、そしてロゲルギストなどによる作品は、今もなお読み継がれている。自然と文化に対する尽きぬ興味、物理学に対する深い造詣に基づく自由な試み、そして明瞭な文体からなるそれらエッセイを読むと、誰しも物理学者の視点を体験できそうな気分になる。しかし、誰もがこのようなエッセイを書けるわけではないし、目指すべきでもないだろう。私たちが試みたのは物理学を専門としない、文系による物理学エッセイである。

「文系のための物理学」は 2019 年度から物理学エッセイを最終成果物とする設計で実施している。それ以前は、物理学に関するポピュラーサイエンスの本を精読したり、高校生向け

のプレゼンを実施したりといった活動を軸としていた。形態は変遷してきたが、その目的は、自分が学ぶ分野とは異なる専門分野をなぜ学ぶ必要があるのか、諸学問の違いと共通性は何か、それをどのように学び・理解することができるのか、そもそも「理解する」ということはどういうことかを、物理学をとおして学ぶことにある。

このような無謀とも言える授業を成立させられたのは、受講学生の皆さんの意欲と、T Aの越後谷駿さんの助力があったからに他ならない。また、研究室見学を快く受け入れてくださった中垣俊之先生と同研究室の皆様、そして授業改善のヒントをくれた内田麻理香先生に感謝申し上げます。

なお、本書では受講者の作品のうち、公開の同意を得たもののみを、実名・ペンネーム自由として掲載した。既に述べた本授業の目的を鑑みれば、各エッセイの内容は、物理学的な正確さを必ずしも保証するものではないこととはご理解いただけるだろう。疑問をもつたらずひ調べてみていただきたい。それがあなたにとっての物理学の始まりになるだろう。

## 目次

物理って何者???	R. A	6
文系が炭酸水をおいしく飲む	橋本佳祐	11
天空のカーテン	K. K	15
天からの手紙	森陸渡	20
私はなぜ相対性理論を理解できないのか	槌谷実衣子	27
物理学者を蹴り飛ばしたい	小林風太	31
七畳一間の物理学	高橋	36
我々はついにブラックホールをとらえたのか	くしろのビスケット	43
真空は存在するのか	安部広一朗	49
エスカレータの落下の危険性の検証の難しさ	佐々木亮太	52
2022年1月26日	根岸建人	58

無視される摩擦力	西田 貴彦	66
初めて学ぶ「いかだ作り」	南 駿祐	70
テレポート学入門Ⅰ	安原 千弘	73
冬道の音色	玉城 海翔	82
バイバイン実現計画報告書	高奥 凧沙	87
雪の白さに	中山 裕斗	91
ゴロゴロ	植松 宏斗	95
電子レンジは本当に体に悪いのか？	池田 瑛人	100
真っ暗	田村 碧慧	106
結露 vs カビ vs 俺	田中 芳樹	109

## 物理って何者？？

R・A

はじめに

物理とは何者なのだろうか？　こんな疑問を持ったことはないだろうか。自分はこのような疑問を中学生ぐらいのときからずっと抱いていた。受験勉強ではとにかく公式を暗記して問題に当てはめるといふ作業ばかりだった。受験勉強をやりながらも、物理とはもっと深淵で高尚なものではないのかという疑問が頭から離れなかった。そこでこの問題について真剣に考えてみることにした。

少し話は難しくなるが、1 物理学と生物学、2 自然派と浪漫派、3 印象派と写実派（芸術）という観点から物理学を眺めてみたいと思う。

## 自然派と浪漫派

物理学に対する接し方は自然派と浪漫派に大別される。自然派は具体的な自然現象から物理学について考察していく立場である。浪漫派は具体性に囚われずに、抽象的な視点から物理学を考察し理論を組み上げるものである。自分が今まで馴染みがあるのは高校物理で、高校物理は体としては具体的な実験から理論が考察されるという立場を取っている。つまり自然派である。しかし大学からの「本物の物理」では主に浪漫派の学者によってなされているものであると思われる。大学からの物理学では理論が先に作られ、観測が後という事例はたくさんある。観測が成されていないにも関わらず、理論が作られるのは頭の中で抽象的に理論が完結しているからできることで浪漫派であることの証拠になる。

## 物理学と生物学

生物学は物理学と比較したときに、より自然派に近いと思われる。なぜなら物理学は物体など一般的に「自由意志の無い存在」を扱うのに対して、生物学は生物など「自由意志を持つ存在」を扱うからである。自由意志を持たない対象を扱う場合は、その振る舞いを予測しやすい

ため抽象的に扱いやすい。よってより抽象的な議論をする浪漫派になりやすい。しかし、自由意志を持つ存在を扱う場合は、持つ意志は予測できない。したがって抽象的ではなく個別具体的に扱っていく必要があると思う。よってより具体的に論を展開する自然派になりやすい。

## 印象派と写実派

芸術の分野ではその描き方によって写実派と印象派に大別される。物理学と関連付けると、写実派は自然派、印象派は浪漫派と共通する。写実派はその言葉からわかるように具体的な事を物をカメラで切り取ったかのごとく精緻に描く技法である。印象派はそれとは対照的に人間がどのように事物を捉えるかという「抽象的」な営みである。当初は写実派がもてはやされ、最終的にはモネらが牽引した印象派が主流になったように、人間の営みとしては最終的に抽象的な方向に進んでいくものであると自分は考える。

これら芸術の具体↓抽象の例から、物理学に対する接し方が見えてくると思う。モネ、マネらは教会の制限や当時の常識（屋内のみでの制作活動、絵の具は混ぜて使う）等を打破し新し

い価値観、技法を打ち立てた。このように具体から抽象へと向かっていくのが摂理であると思う。しかし、それらは初めは受け入れられないことが多い。Artpediaによると「1860年代後半から、マネやドガらと美術的価値を共有する「独立派」的な画家たちは、年に一度、サロン・ド・パリで開催される展示会を企画する保守的な芸術アカデミーから、サロンへの出品を拒否されるようになった。当時、たとえサロン・ド・パリの審査に通過して展示できても、ほとんどの印象派の画家たちは、保守的な批評家や公衆から批判を浴びていた」ようである。これらからわかるように心理的抵抗はあるかもしれないが、高校物理で自然派、つまり具体的に現象を扱い、大学から先は浪漫派、つまり抽象的に物事を捉える視点が必須であるということがいえるであろう。

## おわりに

考察の結果、大学からの物理では「公式を丸暗記する」など具体的なことよりも物事を抽象的に扱う視点が重要だとわかった。物理はそれだけで独立して存在しているものではなく、芸

術や他の学問と関連を持って存在している。そのため芸術など一見関係ないものと結び付けることでよりよく理解できると思った。長年の疑問が少し解消されスッキリした。

#### 引用・参考

夏目漱石：1908 『三四郎』青兎文庫 [https://www.aozora.gr.jp/cards/000148/files/794\\_14946.html](https://www.aozora.gr.jp/cards/000148/files/794_14946.html) (2022年1月27日閲覧)

Artpedia：印象派/Impressionism <https://www.artpedia.asv/impressionism/> (2022年1月27日閲覧)

This is media：「印象派」とは？ モネなどの有名な画家と代表作品を分かりやすく解説 <https://media.thisisgallery.com/20190229> (2022年1月27日閲覧)

## 文系が炭酸水をおいしく飲む

橋本 佳祐

炭酸水ほど仕組みも知らずに味わったつもりになっていくものはなかった。ペットボトルのふたを開けるまでは非常におとなしいのに、開けた途端シュワシュワと音を立て、水の中から気体が抜けていく。飲むと特有の刺激が口いっぱいに広がる。この楽しさを人生で幾度となく享受してきた人は多いだろうが、そのおいしくなる秘密を完全に理解しているという人はそう多くはないだろう。

炭酸水の不思議な点として真っ先に挙げられるのはやはり、「なぜ炭酸水はキャップを開けると泡が出るのか」ということと、「なぜ二酸化炭素を使っているのか」ということだろう。今回はこの二つを起点に、炭酸の刺激の秘密をまとめたので解説する。炭酸水の刺激の秘密を知れば、炭酸水をより深く味わえること間違いない。

炭酸水に刺激を与えると気体が出る理由を説明するうえで重要なのがヘンリーの法則であ

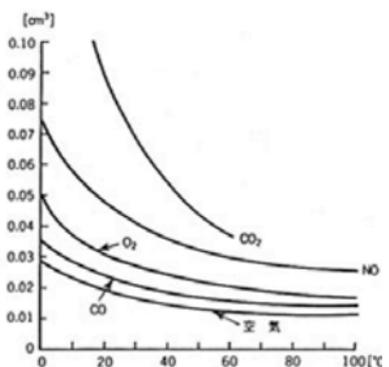


図1 気体の水に対する溶解度 (国立天文台『理科年表オフィシャルサイト』より)

る。ヘンリーの法則とは、溶媒に溶ける気体の物質量は圧力に比例するという法則である。つまり、気温が変わらないという条件では、圧力が二倍になると二酸化炭素が水に溶ける量も二倍になるということだ。ペットボトルが妙にパンパンに膨らんでいるのは、二酸化炭素を水にたくさん溶け込ませるための工夫だったのである。逆に、ふたを開けると、今まで溶けることのできていた二酸化炭素が水中に溶けていられなくなりあふれたのだ。これがシュワシュワの正体である。

次に、二酸化炭素でなければいけない理由である。二酸化炭素よりもたくさん空気中に含まれている気体はあるのに、なぜよりによって二酸化炭素なのだろうか。というか空気自体を水に溶け込ませれば作るのが楽そうである。しかし、二酸化炭素を用いるのには重要な理由がある。図1を見てほしい。この図は、水の温度に対して各気体がどのくらいの量溶けるかを表

している。二酸化炭素の優秀さが一目瞭然だろう。地球温暖の原因になるなど厄介に思われがちな二酸化炭素に、このような強みがあるとは知らなかった。室温に近い20℃で、二酸化炭素は酸素の約3倍、空気の約5倍の体積を溶け込ませることができる。先ほどのヘンリーの法則と合わせて考えるなら、酸素飲料を作ろうと思ったら炭酸水を作る時の3倍の圧力をかけなくてはならないのだ。

また、二酸化炭素に注目すると、温度が高くなるほど水に溶ける量が小さくなることがわかる。炭酸水を冷やすことも、炭酸水をおいしく飲む工夫の一つだったのだ。逆に言えば、60℃の熱い炭酸水を飲みたいと思ったら、単純に考えて3倍近くの圧力で二酸化炭素をとかせばよいのだ。ただし気圧の関係上ペットボトルで作れるかは怪しいが。

まとめると、高い気圧で作ること、低温で保存していること、気体に二酸化炭素を選択したことすべてが、我々により強い刺激を提供してくれるための要素だったということが分かった。これからはあなたにも、工夫によって限界まで詰め込まれた二酸化炭素に思いをはせて味わっていただきたいものである。

引用・参考

国立天文台：「気体の水に対する溶解度 冷たい水には酸素が一杯」『理科年表オフィシャルサイト』  
[https://www.nikanenpyo.jp/kaisetsu/buka/buka\\_012.html](https://www.nikanenpyo.jp/kaisetsu/buka/buka_012.html) (2022年1月27 日閲覧)

古川義宏・高岡隆志：2002 「二酸化炭素の溶解度 その温度変化と圧力変化の簡便な測定法の開発と熱力学的パラメーターの算出」『化学と教育』 50 (6) 458-460

岡博昭：2008 「第99章 気体の溶解度」『岡博昭のページ』 <http://www.osaka-kyoiku.ac.jp/~hiroakio/2008/08ko-099.html#%E6%B0%97%E4%BD%93%E3%81%A9%E6%BA%B6%E8%A7%A3%E5%BA%A6> (2022年1月27 日閲覧)

片桐利真：2019 「二酸化炭素が水に溶けやすい理由 水中の炭酸の存在」『東京工科大学工学部応用化学科BLOG』  
<http://blog.aceng.teu.ac.jp/blog/2019/06/post-4nd0.html> (2022年1月27 日閲覧)

## 天空のカーテン

K.  
K

天空に揺らめく幻想的なカーテン、オーロラ。日本でもオーロラ現象を観測することは不可能ではないが、圧倒されるようなオーロラを見ることは困難を極めるだろう。それでもなお、その魅力にひかれる人々の数は到底計り知れない。自分もまたその一人である。きつかけはあまり覚えていない。テレビでたまたま見かけたのかそれとも凶鑑で見つけたのか。初めて見た時にどんなことを感じたのかも今となっては覚えていない。しかし感動したことは確かである。

そもそもオーロラとはどんな現象で、どういった仕組みで発生するのだろうか。実は発光のメカニズム自体は複雑なものではない。まずオーロラとは太陽からやってくる粒子が地球の大気に含まれる原子や分子と衝突することで発光する現象である。太陽からやってくるいわゆる「オーロラ粒子」が太陽の大気である「コロナ」から噴き出して、地球に到達すると磁場の影響で加速して大気中の酸素や窒素と衝突して発光する。

このメカニズムは日常にも多く見られる。例えば一昔前のブラウン管テレビはオーロラの縮小版ともいえる。電子（粒子）が放出されるとブラウン管で加速したのちに蛍光面に衝突して発光、すなわちテレビがつくのである。

大気中の原子の違いはオーロラの色の違いと関わっており、酸素ではオーロラの色としてよくある曰っばいグリーンや、オーロラの上側では赤っばい発色をする。窒素はブルーを発色する。

オーロラの魅力は淡い色はもちろんだが、なんととってもカーテンと比喻されるひらひらとした揺らめきであろう。どうしてカーテンのような揺らめきがおこるのだろうか。

と言っておきながら実はオーロラは揺らめいてはいない。どういうことか。これは駅や電車などの電光掲示板を想像してもらえたとわかりやすいかもしれない。電光掲示板はしばしば字が流れて表示されるが、実際には流れていない。電球の点滅を計算することによって流れているように見せるのである。オーロラも同じである。オーロラ粒子が原子と衝突して発光するまでには反応時間が存在するため時間差は当然生まれる。この時間差で消えたり発光

したりすることであたかもカーテンのように揺らめく幻想的な光が広がるのである。

オーロラは自然現象のなかでも特に幻想的で神々しく、これまで多くの人を魅了し続けてきたことであろう。このオーロラはもともとはローマ神話の女神の名であり、オーロラ女神は夜の暗さを追い払い、この世に光を与える存在として信仰されてきた。ラテン語でも「東の方角」「夜明け」「暁」といった意味を持つ。

突如として空に現れる幻想的な光は、古の時代から希望と絶望を与えてきた。あるところでは神の世界と人間の世界の架け橋と言ったり、別のところでは彗星と同じく災害の前兆だ、などとみなされてきた。学者の意見もあやふやなものが多かった。「天の裂け目から炎となつて噴き出すガス」だとか「魚の大群が雲に反射」だとか。時代が進み科学が徐々に発達してくると、17世紀に中央ヨーロッパの各地でオーロラが発生した際にはかの有名なガリレイが関心を持ったと言われている。オーロラの名付け親もガリレイだという説が有力である。19世紀になると電磁気学も体系化してきて科学的好奇心を持つ人は増えてきた。そう言った歴史を経て現代のオーロラ研究につながるのである。

人類はこれまでも超常的なものには信仰を示したり絶望してきたが、同時にそういったものは芸術分野や文化に大きく影響与えるものである。多くの詩人や芸術家はオーロラを題材に作品を残してきた。特にノルウェーではオーロラは国のシンボルの存在で、オリンピックが開かれた際にもロゴに起用されたり、紙幣に描かれたり、多くの絵本に登場したりしている。幻想的な光は絵本との相性がいいのだろう。日本でもオーロラをユニークな手法で描いたり信楽焼や書で表現したり、オーロラに魅了された芸術家は確かに存在する。

冒頭で、オーロラを日本で観測することは困難を極めると言ったが唯一観測の可能性がある場所、それが北海道である。と言ってもそれは北海道の中でも地域が限られており、時期も簡単に予測できるわけではない。発現は奇跡に近いだろう。私は現在北海道大学に通う大学生であるがこのエッセイを執筆したのも何かの縁だ。在学中にその奇跡が訪れることを願うばかりである。

天空から降り注ぐ淡い幻想的な光は見る者全てを魅了する。それがたとえ何ら変哲のない仕組みで日常にあふれている光と同様の仕組みであろうと関係ない。その神々しさは古くか

ら希望と絶望、そして感動を与えてきた。大空とはそれほどまでに大きくかけがえのない気持ちをお我々に与えてくれる存在なのである。

参考

上田洋介…1999 『オーロラ 太陽からのメッセージ』山と溪谷社、66149

## 天からの手紙

森 陸渡

雪の結晶ってなに？

札幌は雪が多い。一応覚悟はしていたものの、いざ雪が降ると「え!? どんだけふるの?」という、北海道に住んで一年目の人なら誰しもがするリアクションをとってしまった。どうやら先日は一日で50センチを超える積雪を記録したようである。それにも関わらず、平気で授業を行おうとする教授たち。多分、雪に対する耐性があるのだろう。耐性のないヒヨコ同然の自分にとって、彼らは鬼に見えた。そんなこんなで一か月経って雪のある生活にも慣れ、正月休みで地元の関東に帰省した時あるニュースが飛び込んだ。「東京、1cmの積雪」。かつての自分なら、雪が降ってくるというだけでとんでもないビッグニュースとして受け止めていたものだが、今となつては「ほう」と涼しい顔でニュースを流す始末である。むしろ、その程度で騒ぐなどという腹立たしさまで出てきた。これはもう、道民ですと言つて差し支えないだろう。

このように雪の降らない地域に住んでいたということもあって、今まで雪に対する興味がなかった。しかし雪が身近なものになると、いろいろな疑問が生まれた。それはなぜ雪の結晶ができるのか、そしてなぜ六角形の形になるのかということである。当たり前だと思われることだがよく考えたら不思議なことだと思ったので調べてみることにした。

### 雪の結晶ができるには

雪の結晶ができるための条件は大きく分けて二つある。一つ目は過冷却された水と水蒸気量が飽和状態の空気があること。二つ目は、水分子の状態変化の時に発生する熱を吸収できることである。

まず一つ目であるが、水というのは必ず0度を下回ると凍るわけではない。0度を下回っても氷にならない状態を過冷却という。水の体積が小さくなればなるほどなかなか凍りづらく、直径が1  $\mu\text{m}$  ほどの水滴だとマイナス40度までは液体のままの状態である。空に浮かぶ雲が凍らないで水蒸気のままではいられるのはこのためである。そしてこの中の水滴が氷にな

表1 氷点下における飽和水蒸気量（小林禎作『雪の結晶はなぜ六角形なのか』より）

温度 °C	飽和水蒸気量 g/m <sup>3</sup>	
	過冷却水に対して	氷に対して
0	4.85	4.85
-4	3.66	3.53
-8	2.74	2.54
-10	2.36	2.14
-14	1.74	1.51
-18	1.26	1.06
-20	1.07	0.892

るとその氷の周りの水滴がいったん蒸発し水蒸気になり、氷の周りに付着して結晶が大きくなるのである。過冷却の状態である水滴は不安定な状態であり、氷の結晶が現れると安定した状態である氷に変わってしまうのだという。

氷の周りの水滴が蒸発してしまうのは、過冷却水と氷それぞれに対する飽和水蒸気量が異なるためである。

上の表1はマイナスの温度に対する飽和水蒸気密度を表したものである。

このように過冷却の水に対して飽和している水蒸気密度は同じ温度にある氷に対して飽和している水蒸気密度よりも常に小さくなる。故に過冷却された水滴の中に氷が発生すると過飽和状態になり氷晶は急速に成長していく。氷晶が成長するということは周りの水蒸気を奪っていくという

ことなのでだんだんと未飽和状態になり氷晶の近くの水滴はそれを補うように蒸発して水蒸気になる。こうして氷晶は成長していくのである。

このようにまわりの水蒸気を氷に変化させて氷晶は成長するのだが、この変化するタイミングで熱が発生してしまう。この熱をうまく奪ってあげることが二つ目に挙げた条件である。熱が発生し温度が上がると、上にある表のとおり飽和水蒸気量が増えてしまうので氷晶の成長が止まってしまふ。熱が奪われる環境にいることが雪の結晶ができる大きな決定要因になっている。

### なぜ六角形になるのか

雪の結晶が六角形になるのは水分子の形に理由がある。

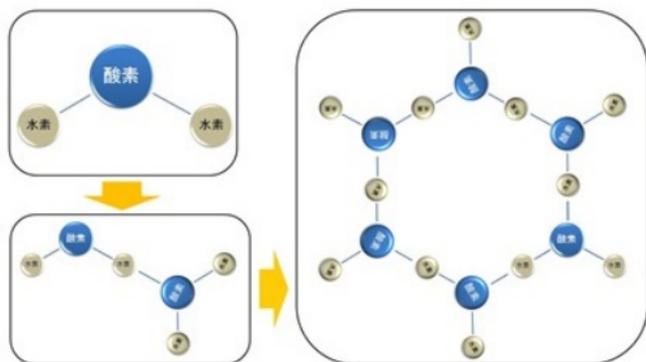


図1 水分子の構造 (北川栄司「六角形」より)

図1のように水分子はブーメランのような形をしており、そのなす角度は約 $104$ 度でありこれは正四面体の中心核 $109.5$ 度に近い数字である。そして水分子同士が水素結合し、正四面体をつくって平面で見ると図1のような六角形の形になるのである。この六角形に結合した水素分子がたくさん集まって一番分子として安定した状態があつた綺麗な六角形の状態なのだという。

また、雪の結晶は大気のと水蒸気の量によって決まる。同じ結晶の形ができないのは大気の状態が刻々と変化するためである。

と、ここまで説明してきたがこの説明は非常にざっくりとしていて明確に雪の結晶のメカニズムを証明していない。しかしその説明をするには筆者が無知すぎるの

で、ここではこのざっくりとした説明のみとさせてもらう。

## おわりに

題名の「天からの手紙」は北海道大学の教授として世界初の人工雪の製作に成功した中谷宇吉郎氏の名言「雪の結晶は、天から送られた手紙である」からよる。その言葉のとおり、雪の結晶の形から空が今どういう状態なのかを知ることができるのは先ほど述べたとおりである。雪が降ってだるいなあとおもう気持ちでいっぱいだと思うが、足を滑らせないように路面を見るだけではなく、雪を見て空の状態に思いをはせるのも悪くないのではないか。

## 引用・参考

荒木健太郎：2014 『雲の中では何が起こっているのか』ベレ出版

小林禎作：2013 『雪の結晶はなぜ六角形なのか』筑摩書房

三井化学：2021 「雪の結晶はなぜ六角形になるの？ 水分子の構造から原理を解説」『そざいの魅力ラボ』

[https://jp.mitsubishichemicals.com/jp/molp/article/detail\\_20210113.htm](https://jp.mitsubishichemicals.com/jp/molp/article/detail_20210113.htm) (2022年1月27 日閲覧)

北川栄司：2017 「六角形」『環境省 北海道地方環境事務所 アクティブレンジャー日記』〔北海道地区〕

<https://hokkaido.env.go.jp/blog/2017/02/post-178.html> (2022年1月27 日閲覧)

中谷宇吉郎：1938 『雪』 青空文庫 [https://www.aozora.gr.jp/cards/001569/files/52468\\_49669.html](https://www.aozora.gr.jp/cards/001569/files/52468_49669.html) (2022年1月

27 日閲覧)

## 私はなぜ相対性理論を理解できないのか

樋谷 実衣子

なんだかんだ言って、相対性理論という言葉を目にする機会は多い。私は文系の学生で物理学についてはからつきしであるが、科学史や科学者について書いてある本を見ると大体、相対性理論について書かれてある。私は何度それらを読んでも相対性理論がよくわからない。本自体はおそらく万人向けに書かれたもので、物理学を学んでいなくてもわかるように著者は書いているつもりなのだろうが、私が納得できたことはない。大学の講義で物理学に触れる機会があった。その中でふと、私の世界のとらえ方と物理学の世界のとらえ方が違うから私は相対性理論を理解できないのではないかと思った。せっかくだしわからない相対性理論について「いい加減に」理解をし、私と物理学の考え方の違いを考えようと思った次第である。はじめに述べておくが、今回、相対性理論についての詳しい解説を書くつもりはない。詳しく知りたいなら、より分かりやすく解説してくれる本や動画はたくさんあるのでそちらを読んでほしい。私が相対性理論、特に今回は特殊相対性理論について理解していく過程で、考えたこと、感じたこと

をまとめていきたいと思う。

私はまず、相対性理論について解説されている本をよんだ。大体の本は図解を用いて丁寧に解説されていた。しかし、私は本を読んでも相対性理論について理解できなかった。最初のほうはサクサク読めるのだが、途中でよくわからない話が出てきたり、図解が何を示しているのかがわからなくなったりすると、そこから先に進めず、結局断念してしまった。

次に大学の講義中に物理学を専攻しているTAさんに簡単に解説をしていただいた。TAさんは速度の計算式を用いて解説してくれた。私は読んでいた本の中で「光速度不変の原理」については知っていた。「光速度不変の原理」とは簡単に言うと「光の速度は絶対に変わらない」ということである。すると(速度)  $\parallel$  (距離)  $\cdot$  (時間) という式を考えると、光速度は変わらないから、距離と時間がゆがむということが相対性理論らしい。個人的にこの解説はとても腑に落ちた。

さらに私は、YouTubeの解説動画を見た。するとだいぶ理解ができたような気がした。大体、先ほどのTAさんの解説がもとになっていて、具体的に光の速度、距離、時間を具体的に

に文字で設定して計算式でかなりわかりやすい動画だった。計算に基づいて考えると確かに物は移動すると空間と時間は縮むということが理解できたのだ。

さて、ここで私はなんで最初の本を読んだ段階で理解できなかったのか考えた。読み返すとすべての本でTAさんの解説と同じような解説が行われていた。理解ができなかった理由を自分なりに二つ挙げると、一つは本による解説はより詳しくなりがちということ、そして何が大切なのかわかりにくいことだと思う。文章というのはこちら側が意識していない限りとても一定なものだ。もちろん文字の色を変える、太字にするなどの工夫はみられるが、基本的にどの部分を詳しく読むかは読み手の裁量に任せられている部分がある。相対性理論を理解しようとする前の私はそもそも理解する気はなかった。大体、私が相対性理論を見かけるのは科学史とか科学者の本を読んでいるときで、私にとって大切だったのは相対性理論ではなくアインシュタインであることが多かったので理解する必要がなくて流し読みしていた。反対に理解しようとして本を読んでいた私は、力みすぎて本に書いてあることを一から十理解しようとしていたのかもしれない。相対性理論について解説している本は大体その背景や元となる理論、実験について詳しい説明が載っている。そこが理解できないので先に進めないことが多かった。

私は最初、自分が理解できない原因を私と物理の違いに求めていたが実際は違った。なんてことはない、私の学ぼうとする姿勢と本という媒体の相性の悪さが私を相対性理論から遠ざけていたのだと今になって思う。

## 参考

Newton…2019『Newton別冊 ゼロからよくわかる相対性理論の超人四書 ニュートンプレス

ジェームズAコールマン…1996『相対性理論の世界』講談社ブルーバックス

大宮信光…2018『眠れなくなるほど面白い図解相対性理論』日本文芸社

グウェル・オス・ガール/Gwedu Os Gar 【ごじゅんご】…2021【#ガッキー裁判】山神カルタが相対性理論を理解するやっしい授業【にじゅんご】 <https://youtu.be/XJPEQJFHDtw> (2021年12月29日閲覧)

予備校のノリで学ぶ「大学の数学・物理」…2019「中学数学からはじめる相対性理論」 <https://youtu.be/voFHToRM4xI>  
(2022年1月4日閲覧)

## 物理学者を蹴り飛ばしたい

小林 風太

私は物理学者が大嫌いである。

「物」の「ことわり」を明かそうとしているくせに何か大事な「モノ」を見ないようにして理論や技術をぐだぐだと毎日探し続けている。なんてくだらない連中であろうか。そのくせ人前で授業や発表をするときは自信満々であるのが気に入らない。

物理学者はあたかも自分は宗教なんて信じてないかのように振る舞うのだ。数字や公理を神として無意識に崇めていることを彼らは忘れてしまったのだろうか。それともわかっているのだろうか。世界中の物理学者を集めて一人ずつに問い詰めてみたいものである。きつと多くが迷惑そうな顔をするに違いない。とにかく大嫌いな物理学者に一発蹴りを浴びせたい。些か性格が悪いが私はそんなチャンスをいつでも窺っているのだ。

私は哲学者が大好きである。

疑うところまで疑い抜いて自分を囲むあらゆる物があやふやでよく分からなくなる、そんな妙な連中である。ハンパなところまでしか疑えない「アイツら」とはまるで格が違う。哲学者には本当に大事な「モノ」が見えている。彼らは自分の立つ土台がボロボロである事を認めているのだ。自身の語ること、書くこと全てが脆さを抱えていることをよく理解している。言うまでもなく私は哲学者である。

数学を研究する哲学者は多い。理系分野のあらゆる土台となる言語の数学に魅力と可能性を見出したいと思うからであろうか。物理学者たちにも見習って欲しいと思うところである。

あれやこれやと考えていると、私の頭の上にりんごが落ちたのである。

気づくと私の前で二人の男が対談をしているのである。片方はニュートンに、もう片方はプラトンによく似た男である。ニュートンらしき男は、

「今のりんごの動きを記述し理解するには、絶対空間と絶対時間をもとにして重力加速度と

速さと落下距離を数式で表せばよい。そうすればりんごの落下を物理的に表すことができる。」

と言った。どうやら彼は絶対空間と絶対時間とやらを彼自身の疑いの限界としたらしい。

それに対してプラトンらしき男は

「いや、あのりんごは本当のりんごではない。りんごのアイデアの影を見ているだけなのだ。たしかに数学はアイデアに近づく手段ではあるが、それでアイデアに辿り着けるとは言い難い。」

と答えた。

プラトンらしき男は数学を信頼しているようだったが、私にはどこか不安げにも見えた。

私の頭の上のたんこぶを特に心配することもなく二人の男の対談は続く。体感で数百年が経過したような長い対談だった。

気づくと物理学者らしき男の顔が変わっていた。アインシュタインによく似ている感じである。時間と空間は相対的だとか何やら難しそうなことを言っている。

哲学者の顔はよく見えなくなった。そして何も語ろうとはしなかった。物理学者に言い負かされてしまったのだろうか。

物理学者の独白を聞き終え、私は哲学者に代わって物理学者に反論をしようとした。

そのとき、トースターの音が鳴ったのである。クルマの音が、エアコンの音が、科学特集をやっているテレビの音が、そして誰かから送られてきたメールの着信音が。ひんやりとしてかたい無機質な生き物たちの声が確かに私の耳には聞こえるのである。どんなに耳をふさごうとしても聞こえてしまうのだ。

ああ、私も物理学者なのだ。哲学者なんかじゃない。もし私が疑い深い哲学者なのであれば、彼らの声が聞こえるはずがないのだ。どうせハンパ者なのである。

頭の中では物理学者の男が一人で何か呟いている。彼の目には私にはもう見えないあの哲

学者がまだ映っている。

やっぱり私は物理学者が好きである。

ならば、大好きな彼らを不意に蹴り飛ばさないように注意しなくては。

## 七畳一間の物理学

高橋

この世界には2種類の人間がいる。部屋が綺麗な人間と、汚い人間だ。その2種類でいうと、わたしはどうしようもなく後者である。わたしの部屋がどれほどに悲惨かといえば、2週間もあつたらこの7畳ワンルームの床は見えなくなり、机の上が物置と化し、置き場所を失ったパソコンを机に積まれた書類の上で起動せざるを得なくなるほどだ。

今この文章を書いている時でさえ、床にはなぜか本が散逸している。ああ、そういえばこの本は読みかけなんだった。他にやるべきことがある時ほど読みかけの本の続きは気になつてしまふものだ。愚かなわたしはこのエッセイの執筆を放り出して、床から1冊の本を引っ張り出すことにした。

それは熱力学の本だったのだが、ちょうど『エントロピー』という概念を説明している部分で止まっていた。エントロピー。ゲームなどで名前だけは聞いたことがあるという人も多いの

ではないだろうか。わたしもその内の1人で、このエントロピーという概念については響きが格好いいという認識しかなかった。

本によればエントロピーというのは『乱雑さ』や『無秩序さ』の指標であるそうだ。分子などの粒子に対してよく用い、ある空間内に存在する粒子がどれほど乱雑かどうかを表すというわけである。このエントロピーが大きければ大きいほど乱雑だというのだが、加熱量に比例して大きくなっていく。さらに、粒子の存在する空間の体積が大きいほど、また粒子の数が多ければエントロピーは増加するらしい。

これを見て何か思うところはないだろうか？ わたしには、このエントロピーという概念は部屋の片づけに似ていると思われて仕方がない。部屋が広ければ、部屋の中にある物が多ければ、その部屋は散らかりやすいだろう。そして、部屋が暑ければ放置された空の食器なんかは大変なことになっていき、部屋の秩序は失われていくだろう。

すごいな、物理学。部屋が汚いということすらひとつの概念で表すことができてしまうのか。

そう考えると、物理学というのも部屋の片づけに似ているのでは？とまで思ってしまう。だがそんなことを急に言われても少々突飛な話に聞こえるかもしれないので、例を挙げて説明しよう。

『 $E=mc^2$ 』という方程式を見たことはないだろうか。この公式は『世界でいちばん有名な公式』とも謳われる、アインシュタインが発見した方程式である。この式を知らなくても『相対性理論』という言葉なら人生で一度は耳にしたことがあると思うのだが、この『 $E=mc^2$ 』という式はこの相対性理論によって導かれたものなのだ。

しかし世界でいちばん有名だというには優れた公式なんだろうなと思うものの、一見してそのすごさはわからない。わたしたちが公式と聞いてぱっと思いつくような、たくさんアルファベットが複雑に絡み合っているようなものでもない。むしろ、この式にはEとmとcの三つの文字しか存在しない。そのうえ方程式の中で掛け算しか行われていないのだ。そんなシンプルな式のどこがすごいのか？と疑ってしまうかもしれないけれど、そのシンプルさこそがすごさの神髄なのである。

この式に用いられているアルファベットのうち、Eはエネルギーを、mは物体の質量を、そしてcは光速を表している。そしてこの式が何を示しているのかを日本語で表現すると、『エネルギーは、物体の質量に光速の2乗を掛けると求められる』ということである。つまり、エネルギーは、その物体の質量と互換性があり、お互いに変換できるといことなのだ。

実は、このエネルギーと質量という二つの概念は、アインシュタイン以前は全く無関係の別物なのだと考えられてきていた。そんな二つに関係がある——いや、それどころかこれらは見かけが違うだけで同じものなのだというのを、アインシュタインはこんなにもシンプルな式で証明してくれたのだ。この世界を取り巻く複雑怪奇なおびただしい量の概念を、わずかな公式や法則でまとめあげることが物理学では目指している。だから、この公式は素晴らしいとされているのだ。

さらにスケールの大きい話だと、超ひも理論というものもある。こちらもとても有名かつその変わった名前のために聞き覚えのある人もいるのではないだろうか。

この超ひも理論というのは、簡単に言ってしまうとこの宇宙のすべてが微細なひもからでき

ているのだというものである。厳密に言えば、この世界を構成するものの中で最も小さい素粒子というものの正体がひもであると主張しているのだ。そんな馬鹿な話があるかと一蹴してしまいいそうなの理論を、大真面目に追求している物理学者が存在する。それも1人や2人なんかではない数で。そしてどうしてこの理論が追求されているのかといえは、この超ひも理論によつて宇宙のすべてが説明できてしまうかもしれない、と言われているからだ。宇宙のすべてなんとまあスケールのでかい話をしているものだ。しかしこんなにも突飛な研究を追求していくほどに、物理学者たちは宇宙を貫く真理を求めているということなのである。

ばらばらなものを、まとめる。たった一つの真理を追究する物理学の基盤となるこの精神は、同時に部屋の小片づけという日常の此事の基盤にもなっているのではないか？

部屋の片づけをする時は、雑多でめちゃくちゃなものたちをわずかなスペースに収めることを追い求める。そして部屋が綺麗であれば綺麗であるほど、その部屋の持ち主は賞賛されるのだ。前述した物理学の話と酷似していないだろうか。

だから、きつと物理学者の部屋は美しい。世界をまとめる公式を求める彼らが、自分の住む

部屋をまとめていない道理はない。もしかしたら、部屋が綺麗だから物理学をしているのかもしれない。

そうだとすると、わたしなんかは物理学に向いていないのだろう。わたしにとっては、部屋も世界も多少ぐちゃぐちゃしているくらいがちょうどよいのだ。万物を貫くたった一つの真理なんてものを、わたしは知りたいたとは思わない。宇宙なんて曖昧なくらいでいい。わからないことだらけの方が、世界は面白くあるのではないだろうか。だから、この取っ散らかった七畳一間では、物理学なんてできやしない。宇宙をまとめあげる真理を見つけ出すことなんてできやしない。だけれども、この床に散乱した本とレジュメとゴミの山は片づけてしまった方がいいかもしれない。そうすれば、世界の真理は見えずとも、フローリングの床くらいは見えるだろうから。

#### 参考

鮑本一裕：2008 『今日から使える熱力学』講談社

ブライアン コックス・ジェフ フォーショー (柴田裕之訳) : 2011 『なぜ、EPRなのか?』 紀伊国屋書店  
松尾泰 : 2021 『文系のためのめっちゃやさしい超ひも理論』 東京大学の先生に伝授』 ニュートンプレス

## 我々はついにブラックホールをとらえたのか

くしろのビスケット

そもそもブラックホールとは、太陽のような自ら光る星、恒星の成れの果ての姿である。その凄まじい重力で名を馳せており、光ですら吸い込まれてしまうために、我々はブラックホールを捉えることができない。

シュバルツシルドの半径というものがある。この内側に入ってしまうと、光ですら出られなくなるという三途の川みたいな境目のことである。ブラックホールの勢力圏と言っても良いだろうか。星の質量をとある公式に代入すると、シュバルツシルドの半径を求められる（シュバルツシルドは変換候補に出てこなかった。この名前をいちいち入力するのはやや大変である）。我々の星で例えてみよう。地球と同じ重さの星がブラックホールであればそのシュバルツシルドの半径は  $8.5 \text{ mm}$  である。なんとも小さすぎてブラックホールと呼ぶのもおこがましい気がする。しかしその前提として、星の半径そのものを  $5 \text{ mm}$  にしなければならぬ。こんな前提条件はめちやくちやである。このたとえは現実的ではないことが分かるだろう。

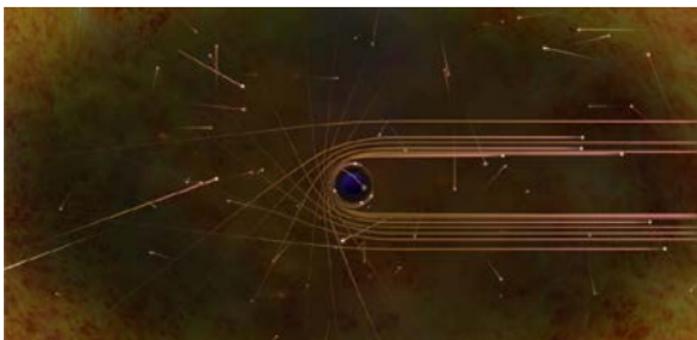


図1 ブラックホールに軌道を曲げられて、地球（右側）に向かう光  
(Credit: Nicolle R. Fuller/NSF)

話を戻すと、ブラックホールからの信号は、決してシュバルツシルドの半径より外には出られない。我々観測者はシュバルツシルドの半径の内側には入れない（もし行けても、帰ってこれなくなる）。だから、ブラックホールは観測できないのだ。

そんなブラックホールの撮影に成功したとのニュースが世界を駆け巡った。2019年のことである。イベント・ホライズン・テレスコープという国際協力プロジェクトが偉業を成し遂げた。5500万光年先のおとめ座銀河団にある、大きさにして約400億 km、太陽の65億倍の質量を持つブラックホールを撮影したのである。

正確に言えば、今回捉えたのはブラックホールシャドウ。それが何なのか、解説しよう。

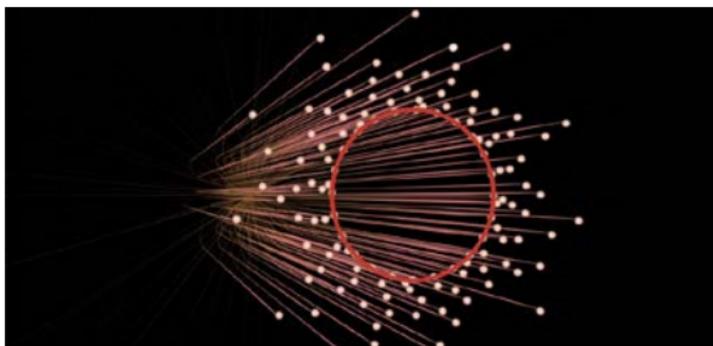


図2 地球に向かってくる光の経路を斜めから見た図。(Credit: Nicolle R. Fuller/NSF)

図1から分かるように、シュバルツシルドの半径の内側に入った光は回りながら吸い込まれていく。

図1で右側に向かっていった光を、地球から見た図が図2である。ここから、内側のある一定範囲では光がやってこないことが読み取れる。これがブラックホールシャドウである。

シュバルツシルドの半径の外側を通る光は、進行方向が捻じ曲げられるため、本来は地球に届かない光が届くようになる。そのため、ブラックホール周辺部は光が多くなって明るく見え、間接的にブラックホールの姿を捉えることができるのだ。この、真ん中の暗い部分がブラックホールシャドウである。

このシャドウの大きさは、月面に置いた野球ボールと

同じくらいに見えるそうだが、そんな極小のシャドウを撮影できたのは、ひとえに優れた望遠鏡が作れたからである。

今回のプロジェクトでは、世界各地の望遠鏡を電波的に同期させることで、地球サイズの望遠鏡を作り出す仕組みを採用。その視力は人間だと300万に相当し、月面に置いたゴルフボールが見えるほどだという。余談だが私の視力は0.1なので、その視力を分けてほしいほど素晴らしい数字である。灰色の月面に白いゴルフボールを置いたら識別できなくなるのではないかと心配はあるが、その視力があればゴルフボールよりも大きい野球ボールは見つけられるだろう。

ブラックホールシャドウの撮影は、ブラックホールに迫れる理論的な限界地点である（ブラックホールそのものから光は出ていないのだから、本体は撮影できないね）。このプロジェクトは偉業を達成したと言える。

しかし、これで終わりではない。ブラックホールシャドウを調べることで、ブラックホールの質量の測定や、ブラックホールという天体の性質についてもいろいろと発見があると期待さ

れている。研究の道に、終わりはない。

……これでエッセイを終えていいのかという声が聞こえてきました。偉業であるそのブラックホールの写真を、なぜ載せないのか。その写真なしではこのエッセイは尻すぼみだ、本体でなくてシャドウの写真でもいいから載せてくれ、そんな声が聞こえてきます。お気持ちは分かれます。しかし、天文学者たちは途方もない歳月をかけて、やつとこのことでブラックホールの姿を捉えたのです。どうか多少の手間を面倒臭がらず、宇宙と向き合う者たちの汗と涙に思いを馳せながら、ブラックホールの写真をご自身で見つけていただきたく思います。その方がきっと、美しく見えるでしょうから。

#### 引用・参考

国立天文台：2019「史上初、ブラックホールの撮影に成功―地球サイズの電波望遠鏡で、楕円銀河M87に潜む巨大ブラックホールに迫る」『国立天文台』<https://www.nao.ac.jp/news/science/2019/20190410-dt.html>（2022年1月5日閲覧）

桜井邦明・1993 『天体物理学の基礎』 地人書館

R175:「どんな物もブラックホールになり得る? 「シュバルツシルト半径」を理系ライターが初心者目線で解説」『study-Z』 <https://study-z.net/100077389> (2022年1月24日閲覧)

## 真空は存在するのか

安部 広一朗

僕は宇宙空間では音が聞こえないとされていることにもすごく納得ができなかった。よく宇宙を舞台にした映像作品でも音は聞こえているのに（作品と比べるのはおかしいが）。だって、音というのは空気や液体、固体の振動が人間の鼓膜を振動させることで認識されるものであるからだ。ということは、空間中に何か振動するものさえあれば音は人間の耳へと伝わることができる。宇宙空間がいくら真空だといえ、音を伝えることができるものは何かは存在するだろうと思っていたからである。しかし、もう一度真空の定義をよく調べてみると、「真空とは空気などの物質が何もない状態」とあり、落胆してしまった。だが、さらに調べてみると何もない状態などありえないのではないかという話も上がっていた。真空とは何もない空間ではなく通常の大气よりも気圧が低い空間であるというものだ。さらに興味を湧いてきた。そもそも本当の意味での何もない真空など存在することができるのか、存在するとしたらその本当の意味での真空の中には空気などは一切ないのだろうか、他にまだ発見されていない未知の物質

はないのか、存在しないとしたり宇宙空間は真空ではないということになり、なぜ宇宙空間では音が聞こえないのかということになり、疑問はさらに深まっていくばかりだ。真空は本当に存在するのだろうか。

結論を言うと、僕は本当の意味での真空（＝本当にどんな物質も存在しない真空）は存在するであろうと考えた。そんなどこにあるんだよと思うだろう。それは宇宙空間どころか今我々が生活している空間の中にもあるのではないかと思う。我々は呼吸をして空気中から酸素を取り込んでいるのだからそんなわけないだろうと思うかもしれない。しかし、この空気中のほんの一部にはほんの少しくらいは何も存在しない微少な空間が存在している可能性もあるのではないかと僕は考えた。そもそも酸素など空気が存在している空間は真空でなければおかしいのではないだろうか。すでに何かが存在しているところに物質が存在することはできないと思うからだ。だが、我々の存在する空間の全体を見るとそこにはいろいろな物質が存在しているためそこは真空とはされない。一方で宇宙空間は分子と分子との間が地球上と比べて広いため真空とされるのだろう。空気中にも真空は存在するかもしれないがそれはほんの少しでほとんどは分子で満たされているため衝撃が生じると分子が振動し、それが波となって音が聞こえ

る。しかし、宇宙空間は分子の間が広くて衝撃が生じても分子の振動が波となることはない。そのため宇宙空間では音が聞こえないのだろう。

#### 参考

- 川村康文：2009 『物理学がわかる』 技術評論社，108：127
- 筈和彦・藤城武彦：2018 『教養としての物理学』 講談社，107：113
- 左巻健男：2021 「真空」とはどんな状態か？ 人類が初めて目にした歴史的な実験 『J B Press』 2021，5.  
15 <https://jbpsr.sismedia.jp/articles/-/65215> (2022年1月18日閲覧)

## エスカレーターの下の危険性の検証の難しさ

佐々木 亮太

はじめに

僕はエスカレーターで歩く人にもものすごい嫌悪感を覚える。なぜなら、もしその人が落ちて頭を打って血を流して死亡するなんてことがあればそのエスカレーターを我々は数か月の間使うことができず面倒になるからだ。それに、その被害が百歩譲って歩いている本人だけならいいが、落ちるときや歩いているときに方にぶつかるといった衝撃で落下し死亡することなどがあつたら大変だ。これ以上エスカレーターで歩こうとする人が現れないように、物理学的にその危険性を証明して歩かないようにしてもらおう説得材料にしようと思う。

なお、この落下パターンは様々なものが想定しうるため、できる範囲でそのパターンを想定していこうと思う。

すべてのパターンに共通する状況を仮定する

- ・落ちる人の体重は 60 キログラム
- ・エレベーターの高さは 6メートル
- ・エレベーターを下っている場合を想定する

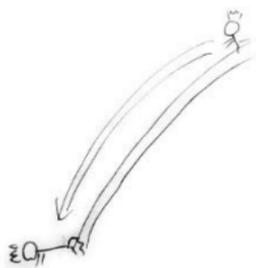
パターンを考えるために考慮すべき点

### 1. どう落ちるのか

下るときに落ちる例としてまず考えられるのは歩いている人、もしくは歩いている人にぶつかったエスカレーターに立って乗っている人が自由落下するケースだ。

この場合、衝撃の式は  $F = mv/t$  というシンプルな式で表すことができる。しかし、考えてみてほしい。こんな状況は考えられるだろうか？ 歩いている人が滑って転んだだけで、ジャンプしているわけでもないのに斜めに吹っ飛んでいく。このような状況が想定されうるのは相当な勢いで後ろからタックルをされた時ぐらいだろう。

## 2、どう落ちるのか？



次に考えられるのは、エスカレーターから転げ落ちるとい場合だ。

これは歩いている本人が落下するケースとして最も考えられるケースだろう。しかし、この場合式としてあらわすのが難しい。転げ落ちるとはどのような状況か？ 横回転？ 縦回転？ どれぐらいの高さから？ エスカレーターの幅によっては下まで落ちないで止まる場合もあるのでは？ どこからどこまでを式に反映しなければならぬのかかなりの検討が必要だ。

以上を踏まえ、本来であれば転げ落ちるケースを想定するのが適当だが、計算をしてどれぐらいの衝撃が出るかを重視したいと私が考えたため、自由落下するケースを想定しようと思う。

自由落下すると想定したうえで、自由落下して地面にたたきつけられるときの衝撃をF(単位N)とするとFは $F=mv/t$ (mは重力加速度、vは落下速度、tは減速速度とする)という式から導ける。

しかしこれでは衝撃の強さを求めているだけで、落ちた人間にどれぐらい衝撃がかかるのかが分からない。まず、どの面でたたきつけられるかによる。例えば背中を打つのか頭を打つのかで衝撃の強さは違うだろう。受け身を取った時に衝撃は弱まるだろうし、地面ではなくエレベーターの角に背中をぶつけたときは背衝撃の強さが変わってくるだろう。さらに、どんな服装もしくはどんな体型かにもよる。例えば落ちる人がクッションを持っているとき、もしくはダウンジャケットを羽織っているときは裸でたたきつけられるときより衝撃は少なくなるだろう。また、落ちる人が脂肪を多く蓄えていた時は脂肪がクッション代わりになつて衝撃が抑えられるだろう。

以上を踏まえ、本来であればこれらすべての場合を想定しなければいけないだろうが、想定する事案が多すぎることがあり、今回は純粹な衝撃の強さを求めることとする。

## 最終的な計算

物を落下させたときの速度 $V$ は

$$V = \sqrt{2gh} \quad (g \text{ は重力加速度、} h \text{ は高さ})$$

エスカレーターの高さは6メートルで、重力加速度は9.8ほどなので、

$$V = \sqrt{2 \cdot 9.8 \cdot 6} \doteq 83.1$$

また衝撃 $F$ は

$$F = mv/t \quad (m \text{ は質量、} v \text{ は速度、} t \text{ は減速にかかった時間})$$

なお、減速にかかる時間はどう考慮すればいいか検討が難しいので、今回は $t \parallel 0.1$ と仮定する。

体重は60キログラムで $v = 83.1$ なので

$$F = 60 \cdot 83.1 / 0.1 = 49,860 \quad (\text{単位はN})$$

## 終わりに

今回は様々な要因を排除してもっとも簡単な計算をしている。だから、今回出した49860Nという数字はほぼ根拠がないものとみていいと思う。よってこの計算を通して自分はエスカレーターから落ちることが危険かどうかも分からなくなってしまった。しかし今回の検証を通じてわかったことがある。それは、物理学におけるモデルを作成するのはものすごく難しいということだ。落ちる姿勢や落ちるものの状態、落ちる場所等考えなければならぬところがある。本来の目的は達成できなかったが、このことを知れただけでも今回の検証は意味のあるものだったと思う。

## 参考

浜島清利：2013『物理のエッセンス 力学・波動 四訂版』河合出版

2022年1月26日

根岸 建人

「街はきつと、物理学的に生きている」

僕はそう考えた。JR直結の地下街でバイトをしていた時のことを思い出しながら。終日立ち仕事なそのバイトの最中、往來の人々を眺めているうちに僕はある感覚にとらわれた。それは、個々の人々が一見バラバラに動いていながらも、全体として秩序を維持したままの流れを形成しているという感覚である。地下街で買い物をしたり、JRの駅に向かったり、駅を通り抜けて街へ飛び出したりと、個々の人々は各々異なった行動をとっている。しかし、そんなバラバラな人々の中に、人々の流れの中に、街全体の秩序のようなものが見えた。

僕はこう思った。こう思ってしまった。

「街は、流動的な秩序を作り上げている。」

僕はその感覚が、物理学者、シュレディンガーの生命観とよく似ていることに後から気づいた。

シュレディンガーは、現代物理学に巨大な牙城を築く、量子力学の土台を作った巨人である。彼は後年、次世代に啓蒙活動を行うようになるのだが、その時期に行われた一つの講演をまとめた本が出版されている。『生命とは何か』という小著である。

彼は、「生物が生きている」とはどういう状態のことを言うのかを物理学的に読み解こうとした。そして、このような結論に至った。

「生物は負エントロピーを食べて生きている」

これはいったい何を言おうとしているのか？

## エントロピー

まず、「負のエントロピー」の前に、エントロピーとは何かを説明する。エントロピーとは、

物理学では熱力学の分野で使われる、熱やモノの乱雑さ（散らばりよう）を表す用語である。エントロピーを説明する例としてよく扱われるのが、砂糖水の例えだ。濃い砂糖水を、真水の入ったコップに入れると、放置したコップの中で砂糖は均一に溶け出していく。初め濃度の高い砂糖水の方に含まれていた砂糖は、比較的固まっている（エントロピー $\parallel$ 散らばりようが小さい）。しかし、真水と砂糖水が溶け合うことで、砂糖は最終的に液体の中にバラバラに広がっていく。（エントロピー $\parallel$ 散らばりようが大きい）

この砂糖水の例にとどまらず、時間がたてば、モノは必ずランダムに散らばり、これ以上散らばらない状態になって安定する。この「これ以上散らばらない状態」のことを「平衡状態」といい、時間がたてば必ずモノが散らばっていく原則そのものを「エントロピー増大の法則」という。さらに付け加えると、この「エントロピー増大の法則」というのは不可逆反応である。つまり、エントロピーが増え、バラバラな平衡状態に達したモノは、また自然とエントロピーの低い状態、散らばりの低い状態に戻ることはない。だから、例えば先ほど例に挙げた砂糖水

をひっくり返し、水を床に散らばすとする。すると、床に散らばった水は散らばったままで（エントロピーの高いままで）、自然とコップに戻ることはない。不可逆反応は、覆水盆に返らずということわざをイメージしてもらえば理解しやすいと思う。

## エントロピーと生物

エントロピー増大の法則は、どんなモノでも成立する。どんなモノでも時間がたてばランダムに散らばっていき、どんなものでもこれ以上散らばらない状態（定常状態）になり、どんなモノでも散らばりが自然と元に戻ることはない。

そしてエントロピー増大の法則は、生物にもあてはまる。

シユレディンガーは、このことを疑問に思った。

「生命というモノも、エントロピー増大の法則に従って不可逆的に拡散してしまふのなら、私たちはなぜ生きていられるのだろうか」ということだ。生命を構成する諸要素が拡散し、定常

状態に落ちることなく秩序を保っているのは、どうしてか？

そこで出た結論というのが、「生物は負エントロピーを食べて生きている」というものだった。

### 負のエントロピー

「負のエントロピー」というのは、エントロピー $\parallel$ 乱雑さ $\parallel$ ランダムの逆、つまり秩序のことだ。負のエントロピーを食べて生きているということはつまり、秩序を食べて生きているということである。

もちろん、これは比喩だ。もう少し具体的に言い換えてみる。

生物を構成する諸要素は、エントロピー増大の法則によって、拡散していく。たんぱく質や、組織や、高分子は、時間がたてば変性し、崩壊し、分解される。ここで生物は、あるシステムを使い、その命が拡散していくことを防ぐ。それは、「代謝」というシステムだ。

### 秩序を食べて生きる

生物は、代謝を用いて、エントロピーが拡散しきる前に自らの構成要素を老廃物として捨てていく。そして、他の生物を食べるのと一緒に、その生物からエントロピーの低い資源を吸収し、自身の構成要素と交換しているのだ。

生命が生きているということをシュレディンガーは、負のエントロピーを食べることだと述べた。それは、生命が自らの構成要素を、絶えず他の生物から吸収していく流れの中に置くことだった。

生物は周りの環境から、負のエントロピーを受け取って生きている。生物は、秩序から秩序の流れの中にその身を置いている。これこそが、シュレディンガーが物理学的にみた「生きている」という状態のことだった。

生命がその構成要素を一定の秩序の流れの中においているように、私が見た街も、全体として秩序のある流れを作り出していた。

街を一つの生命体としてみた時、その構成要素である人々は、その身体を流動的なものとして、街の中で生きている。人々が街で生き、働き、移動することが、街全体の秩序を作り出す。一つの生命として、街は秩序を形成している。そう、人が街で生きるとき、街も生きているのだ。

横断歩道で人々が一斉に動き出す時、駅の改札を人々が通り抜ける時、そんなふとした瞬間に僕たちは街の中で生まれる流動的な秩序を見出すことができる。

地下街でバイトをしていた時、僕が街の中に見出した感覚は、やはりシュレインガーの生命観と似つかわしいものだと思う。往來の人々を見つめながら、僕は街の秩序ある流れを感じていた。

そしてその流れを、僕はとても心地よいと思った。

参考

シュレディンガー(岡小夫・鎮目恭夫訳)・・2008『生命とは何か』岩波書店 137,149

福岡伸一・・2007『生物と無生物のあいだ』講談社, 第八章「なぜ原子は小さく人は(原子に対して)相対的に大きいのか」,  
第九章「動的平衡とはなにか」

藤田祐幸・槌田敦・・1985『エントロピー』現代書館

## 無視される摩擦力

西田 貴彦

世の中には、「私は物理学が大好きだ!」という人がたくさん存在する一方で、「物理は苦手だ or 嫌いだ」という人も当然存在する。高校一年生の頃、物理基礎の中間テストで 29 点という点数を叩き出した（もちろん、100 点満点中である）自分は、その後者に含まれる人間である。「いや、もつと直撃に勉強すればいいだけだろ」といったツツコミが当然予想されるが、ここでは一つだけ釈明の機会を頂きたい。何せ、自分は高等学校の「物理基礎」といういわば一般的な日本人が人生で初めて物理学に触れる機会であり、物理学の入り口のような存在の科目に対して、一つだけ釈然としない点があるのである。

一般的に、高等学校の物理で扱われる問題といえば、「水平面と  $\theta$  の角度を成す斜面上を、質量  $0$  の物体が滑り落ちるとき」といったものである。一見、厳密に定められた条件下で、その回答は議論の余地なく一つに定まるような、そんな雰囲気醸し出している。だが、問題はここである。問題文をさらに読み進めると、「ただし、斜面上の摩擦は無視できるもの

とする」とある。いや、少し待つてほしい。その他の条件については数字を羅列して仰々しく定義しているにも関わらず、摩擦だけは都合よく無視して解いてくださいとは、一体どういう見であろうか。現実世界にそんな斜面が存在するともいうのか。冬の北海道の凍結した道路ですら、少しの摩擦力は発生していると聞く（でない、歩くことができない）。つまり、高校物理の問題で設定される状況は、端的に言えば「ありえない」状況なのである。もつと酷い（？）ものだと、「摩擦を無視できる滑らかな床の上を」などと開口一番に摩擦力が存在を否定される始末である。自分が物理について釈然としないと感じている点は、ここにある。要するに、物理学は現実世界で物体・物質に起こる現象を説明する学問であるのに、確かに存在する数値・現象を堂々と捨象してしまつてよいのか、という疑問である。

その理由として主に考えられることは二つある。一つ目は言わずもがな、計算があまりに煩雑になるのを防ぐためであろう。摩擦力も考慮に入れましようということになると、では次は空気抵抗、では次は……という風に、考慮に入れて計算しなければならぬ事象が次々と鎌首をもたげ、高校生には手が負えなくなるだろう。しかしこの理由だけだと、摩擦力くんはただ「面倒くさいヤツ」だから無視されているということになつてしまい、可哀想である。ここではも

う一歩踏み込んで、そもそもの物理学の姿勢に目を向けて、より納得のいく理由を考えてみることにする。

二つ目の理由には、そもそも物理学は自然をありのまま扱う学問であると言い切れるかというところ、そうではないということが関係してくる。夏目漱石の『三四郎』のなかで、野々宮君は光の圧力を測定する実験を行っている。この実験は、自然環境には存在しない状況を人為的に作り出し、それを観測する方法で行われていた。これは自然を扱っていないから物理学ではないといえるだろうか。否、現実世界で起こる現象を説明しようとするこの実験は、間違いなく物理学であるといえるだろう。人工的に整えられた環境での物質の運動を捉えることも、当然、物理学なのである。この事実が、「摩擦を無視する」高校物理に対する疑問を解消する糸口になる。

どうということかというところ、高校物理における「摩擦を無視する」という行為は、「人為的に作り出された環境のなかで起こる現象を、より端的に説明する」という物理学の側面に通じているのではないか、ということである。摩擦の存在しない斜面を想像上に作り出し、それを考え

させることで、物理学というのは人工的に整えた環境を、なるべく簡潔に説明しようとする学問であるということを、我々に伝えてくれているのかもしれない。

こう考えると、今もどこかで徹底的に無視され続けている摩擦力も、少しは浮かばれるだろうか。高校物理の被害者ともいえる摩擦力に想いを馳せ、筆をおくことにする。

#### 参考

夏目漱石：1908 『三四郎』 青空文庫 [https://www.aozora.gr.jp/cards/000148/files/794\\_14946.html](https://www.aozora.gr.jp/cards/000148/files/794_14946.html) (2022年1月27日閲覧)

國友正和 他：2017 『改訂版 物理基礎』 数研出版

## 初めて学ぶ「いかだ作り」

南 駿祐

私は大学1年目の春、知人の悪ふざけで日常的に出た廃材を用いていかだを自作し、川下りを行なった。そのときはただ闇雲に水に浮きそうなものをいかだにくくりつけて楽しんだだけだったが、今物理学を少しづつ知り始めた私は一つの疑問を持った。水に浮く、とはどういうことだろうか。プールに入ると私たちの体は浮かんでゆくし、海に目をやるとあんなに重そうな巨大な船舶がぶかぶか浮かんでいる。世の中のこのような不思議な現象は流体力学における「浮力」という学問領域にまとめられ自然なものとして扱われている。

ところで、浮力とは何だろうか。一般的な参考書を見るとこう書かれてある。「流体の中に物体を沈めると、流体の圧力のため物体には上向きの力が働く。この力を浮力という」あまりぱっとこない説明だ。また、どうやら浮力についての問題を考える場合、「アルキメデスの原理」とよばれる法則を用いるらしい。その原理とは水の中に液体内の物体は沈んでいる部分と同じ体積の液体の重さに等しい大きさの浮力を浮けるというものである。なるほど、これ

なら複雑な計算をしなくても浮力についての概要がつかめそうである。つまり、水につかっている体積分と同じ大きさの水の重さの分だけ重力に逆らって上向きに働くということだ。その力が物体を上からおす圧力よりも強いために差が生じてものが浮かび上がるということだ。

今、浮力についてのざっくりとした仕組みを学んだ上で作りたいかだを見直してみると、使った廃材は空ペットボトルや発泡スチロールなどの「水に浮きそう」なものたちであった。アルキメデスの原理を通して考えれば、水に沈めた物体の大きさによってのみ浮力が変化するので、(今回は同じ性質の水を使っていたので水自体の密度などはいったん考慮しないでおく)なるべく大きく、なるべく軽いものが適材ということである。先に挙げた素材はまさしく体積が大きい割には空気などを含んでいて質量は軽い。いかだにぴったりの素材である。つまり、私は(これを読んでいるみなさんも)水に浮きそうな物質を考える際、意識しないうちにアルキメデスの原理を認識していたのである。

考慮しなかった水について調べる。水の質量は1L $\parallel$ 1kg、1Lは1000 $\text{cm}^3$ なので50kgの人間を浮かべるには単純計算で50000 $\text{cm}^3$ +素材分の水を押しつける、なるべく軽量な物質でいかだを作れば良い事となる。いかだを浮かべる液体の質量によって浮力が変化して

くるので、泥などが混ざったドロブ水やナトリウムが溶けた海水の方がより浮きやすくなるが、計算がかなり複雑となるため、純粋な水で浮くいかだであれば他のどの液体にも浮かぶと考えるていいだろう。

以上より、文系なりに、無知なりに、浮力の概要をなんとなくつかんで、水に浮くいかだがどういうものなのかを理解できた。無意識にアルキメデスの原理を認識していたように、日常の至る所に物理学は潜んでいて、それは文系の私たちでもなじみの深いものであるようだ。と、ここまで研究してきたが、私はあることを思い出す。はじめに登場したいかだを作ろうといいだした知人が「何も考えずにただ浮かびそうなものをくつつけるバカらしさが楽しい」と言っていたことを。私のこれまでの努力は、出来ないかだから川に落ちた時のように、水の泡となくなってしまった。

#### 参考

阿部龍蔵…2007 『はじめて学ぶ力学』サイエンス社

## テレポート学入門Ⅰ

安原 千弘

とある超能力アニメの一節にこんなシーンがある。

テレポート使いの女の子が銀行強盗を追い詰めた。その強盗は抵抗し、壁へと後退しながらナイフを構える。彼女はおもむろに小さな鉄の棒を取り出し、それをテレポートさせ強盗を壁に貼り付けにする。強盗は身動きが取れない。そして彼女は言う。

「この棒を体内にテレポートさせることもできる。それ以上何かするようであれば、それを実行する。」

そして強盗は抵抗をやめた。

かつこいい。思わず口から漏れた。

が、こんなものフィクションの産物であつて、現実では起こりえるはずがない。なんせテレポーテーションは瞬時に他の場所へ移動する能力だ。文字通り「瞬時に」である。もし仮に光の速さで移動できれば体感は一瞬時だろう。しかしそれは厳密には瞬時でない。

それゆえこのテレポート能力は不可能であるように思えた。だが現実、それを可能にしようとしている理論がある。そう、量子力学だ。

しかし量子力学とはいつたいなんなのだろう。私は名前を耳にしたことがあるぐらいで、全貌は全く知らなかった。というか量子という言葉の理解すら怪しい。そう思つて本をいくつか調べてみると、それは原子や分子のサイズで起こっている運動に関する論のことであつた。つまりは非常に小さい世界における物理法則の事だ。さしあたり量子は小さい物質のことをかっこよく言い換える言葉だろう、私はそう理解した。どうもここでは不思議な法則が数多く存在するらしい。例えば仕切りの左右同時に存在する分子とか、無から有を生む法則とかだそうだ。

ここまで聞いても私は全く理解できなかった。しかしそれは当然のことだ。ミクロの世界をマクロの世界の住人が観測したとて理解できることはそう多くない。なんせ世界が違うのである。世界、つまり常識が違うのだから、我々が理解できない法則があつた方がいいのだ。まとめると小さい世界には小さい世界なりの法則があつて、それはマクロな世界に住む我々には理解しがたいものである、ということであろうか。

さて、ひとまずこれで私は量子論の不思議な法則を受け入れる準備が整つたと感じた。そこで量子テレポーテーションのやり方について早速図書館で調べ始めたのだが、そこで分かつたことは「どんなに離れても解消されないシンクロ状態」という、これまた不思議な法則が量子テレポーテーションのカギを握っているということだった。

この法則は二つの量子間に働くもので、量子Aが右向きなら量子Bは左向きといった関係であるらしい。ということは「どんなに離れても解消されないシンクロ状態」とは、この右向き左向きの関係性が距離にかかわらず成り立つということを意味しているのだろうか。もしこの

推測が正しいのであれば、シンクロ済みの量子Aと量子Bでは、日本にあるAが右向きと分かった「瞬間」に宇宙の端にあるBが左向きと決まることになる。これははたまた怪しさに満ちている。

だがしかし先ほどマクロとミクロでは世界が違うから受け入れるしかないと豪語した私である。量子論の直感的受け入れにはまだまだ時間がかかりそうだが、その世界は我々の世界と違うことを踏まえた上で、己の懐疑心をひとまずは取っ払って続きを調べることにした。

とりあえずこの法則を受け入れることで量子テレポーテーションに一步近づくといいことはなんとなく理解できる。量子を観測した「瞬間」に向きが確定するという性質が応用のしがいがありそうだからだ。

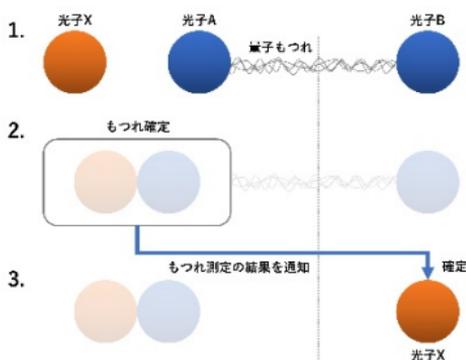


図1 光子は量子の一種。もつれとはシンクロのこと（高森康雄『ニュートン別冊 量子論のすべて』p154の図より作図）

文献には、「量子Xをテレポートさせたいものとし、同時にシンクロ状態にある量子Aと量子Bを用意する（図1-1）」といったことが書いてあった。一つの物を転送するのに三つの物があるということだろう。こちら辺で既に私は量子力学的なテレポートは自分の想像するテレポートと違いそんな予感がしていた。一方文献ではその続きが述べられていて、「量子Xを量子Aにぶつけて、強制的にシンクロ状態にさせる（図1-2）」とあった。これによりおそらく量子AがBとXの「ダブルシンクロ状態」的になっているのだろう。このダブルシンクロ状態によってXの情報Aを介してBに伝わるということらしい。

例えるならば、男子Xと男子Bが喧嘩（＝量子Xと量子Bがぶつかる）しているときに、2人を心配した

女子Aが伝書鳩的役割を担って仲直りに奮闘する（ $\parallel$ 量子Aのダブルシンクロ状態）といったものだろう。その女子AのおかげでXとBがお互いの心情を把握して仲直りし、それゆえ強固な関係へと成長するといった形であろうか。

ところで文献では続きが述べられており、「ダブルシンクロ状態にした後、量子Bを量子Xとして再生させるためにAの補足情報を利用する（図1-3）」とあった。この難解な文を理解するため、もう一度先ほどの例を利用することとしよう。男子Bは女子Aの1回目の説明で理解しきれなかったことがあり、男子Xとの仲が完全には戻っていない。そこで女子Aにもう一度話を聞く（ $\parallel$ 補足情報の利用）ことで最終的に仲直りできた。こういったところでどうだろうか。

この約3ステップを踏まえることで量子力学的テレポーテーションが行えるらしい。しかしどうもこの学術的なレポートは、私の思い描いていた「自分や他の物を任意の場所に送り込める技術」とは少し違うようだ。正しく言い表すならば、「量子を介して情報を高速で伝えてその場で再生する技術」のほうがよからうか。

またここでもう一つ注意すべきなのが、「情報の補足が必要」という点であろう。先ほど何の気なしに述べてしまったが、情報の補足は従来の手段で行う必要があるらしい。つまり瞬時に他の場所へ移動する厳密なテレポートは、量子テレポーションでは行えないということになる。当然のことながら従来の手段では情報を瞬時に伝える方法がないからである。

以上のことをまとめて冒頭のアニメーションを添削してみようと思う。

テレポート使いの女の子が銀行強盗を追い詰めた。その強盗は抵抗し、壁へと後退しながらナイフを構える。彼女はおもむろに小さな鉄の棒を取り出し、それを（同時にシンクロ状態にある二つの量子A、Bを用意して、同時にテレポート先に量子Bを置く。量子Aと鉄の棒を強制的にシンクロさせ、量子Aを量子B、鉄の棒とのダブルシンクロ状態にする。そして量子Aの情報を基に補足を行い、量子Bを鉄の棒として再生する。これにより鉄の棒を）テレポートさせ強盗を壁に貼り付けにする。強盗は身動きが取れない。そして彼女は言う。

「この棒を体内にテレポートさせることもできる。それ以上何かするようであれば、それを実行する。」

そして強盗は抵抗をやめた。

意味わかんない。思わず口から漏れるであろう。だがしかしこれが現実的に考えた物理の産物のアニメだ。私はフィクションに譬易しがちであったため、量子力学という最新理論を基にテレポート能力について考察してみた。しかし結果はどうであろうか。全く美しくなく、難度の飽和が著しいアニメが出来上がってしまった。現実とフィクションは分けて考えたほうが身の安全のためかもしれない。

はたして私が憧れたテレポーターションが本当に実現される日は来るのだろうか。まだ遠そうに思えてならない。

引用・参考

鎌池和馬・冬川基…『とある科学の超電磁砲』KADOKAWA

高森康雄…2021『ニュートン別冊 量子論のすべて』ニュートンプレス、148-155

## 冬道の音色

玉城 海翔

『ガンガン』『キイキイ』『ガヤガヤ』——私たちは様々な音に身をさらして生きていく。建築現場の工事音やら町中のスピーカーから流れるはやりの音楽やら、騒々しいものばかりが目立つものだ。でも、耳を澄ませばもう少し美しい音色も聞こえてくる。例えば、冬の雪国なら。『サクツサクツ』『キュツキュツ』……あなたの足下から！

冬道の雪を踏みしめると、他では聞けない、独特で不思議な音が聞こえる。北海道大学低温科学研究所・前野紀一先生によれば、雪を踏みしめる土地であれば例外なく起こるのである。この現象の名が日本を含め世界中どこを探しても見当たらないらしい。このことを意外に思われた先生は、きれいな砂浜を歩くときの音「鳴き砂」にちなんでか、この現象を「鳴き雪」と名付けられたそうだ（ちなみに、英語にして「スインギング・スノウ」である）。

ところでこれもまた意外なことだが、鳴き雪のメカニズムについても未だよくわかってい

ないところが多いらしい。前野先生が「鳴き雪」という名を提案されるまで特定の呼び方すらなかったくらいであるから、未だ研究途上なのである。そもそも音とは、物体の震えが空気などを通じて耳に伝わることで感じられるものである。鳴き雪の場合もちろん例外ではないため、踏みしめられる雪同士、もしくは雪と靴との間に起きる震えによって音が発生するのだろう。

鳴き雪は雪が「踏みしめられて」音を出す現象だ。それなら、鳴き砂と呼ばれる砂が「踏みしめられて」音を出す「鳴き砂現象」が何か手がかりになるかもしれない。鳴き砂現象についての研究によれば、鳴き砂の層とそこに差し込まれる物体の間に起こる *Stick-Slip* 運動によって周期的な力が引き起こされる。その力によって差し込まれたものが振動し、音が発生するらしい (*Stick-Slip* 運動とは、二つの物体がこすれるときに、二つのものが固着する力である静止摩擦力と、固着せずに滑る時発生する力である動摩擦力が交互に作用することによって起きる振動現象のことである。身近な例として、チョークと黒板がこすれて音が出る現象があげられる)。鳴き雪においては、雪が鳴く現象のうち『キョッキョク』という音がちょうど当てはまる。事実、前野先生による鳴き雪についての研究で

も、一部の条件で Stick-Slip 運動に似た現象が確認されている。

ここまで、物理学の力で鳴き雪の世界へと足を踏み入れてきた。鳴き雪は雪を踏みしめた音全てを含む言葉であるから、『サクツサクツ』といったそれ以外の音にはまた別のメカニズムがある。素人の私には、残念ながらこれ以上一つ一つ分類して検証していくことは難しい。しかしそれでも、私は自分の足で雪を踏みしめ音色を奏で、その音色を楽しむことが出来る。ところで、これはまさしく素人と音楽との付き合い方そのものではないだろうか？ どうして楽器がその楽器特有の音色を奏でるのはよく理解していないが、聞いて楽しみ、時には自ら演奏して楽しむ。音楽は誰にでも開かれている世界だ。鳴き雪の世界もまた、雪国に住む人間全てに開かれている。もしあなたの周りに雪が積もっているのなら、のんびり散歩に出かけて、足下から聞こえてくる冬道の音色に耳を傾けてみてはいかがだろうか。

『サクツサクツ』『キュツキュツ』『ザクツザクツ』『シャツシャツ』『パリツパリツ』  
『ギツギツ』『シャリシャリ』『ギムムツギムムツ』……。今日はどんな音が聞こえるだ

ろう？ 明日はどんな音かな？ 朝と夕方でも違うかも？ 新しい靴に履き替えたらどうだろう？ 走り抜けたらどんな音だろう？ 一步一步ゆっくり踏みしめたなら？

——どうして、こんな音が鳴るんだろう？——

初めての音色に出会ったなら、ちょっとした「不思議」を見つけられたなら、そこから繋がる物理学の世界へと、一歩足を踏み入れてみよう。入り口はそこら中にある。全部を知ることとは出来なくとも、あと少しを知るために、物理学は大きな力になってくれるのだ。



参考

前野紀一「『鳴き雪』を聴く」『日本雪氷学会北海道支部』[https://www.seppyo.org/hokkaido/essay/es\\_maeno](https://www.seppyo.org/hokkaido/essay/es_maeno) (2022年1月17日閲覧)

日高重助・三輪茂雄…1981「鳴き砂の発着機構について」『粉体工学全集』18(5)301-310

中野健…2007「ステイックスリップ回避のための設計指針」『日本ゴム協会誌』80(4)134-139

赤木優啓・藤井文夫…2009「チョークと黒板の間に発生するStick & Slip運動について」『計算力学講演会講演文集』22, 569-570

マハジャン・ブニット・荒川政彦・前野紀一…2006「高密度雪の圧縮実験Ⅱ」…荷重測定および鳴き雪との予備比較」

『雪氷』68(2)131-139

## バイバイン実現計画報告書

高奥 凧沙

無限にものを増やしてみたい、という夢を誰しも抱いたことがあるのではないだろうか。

そんな夢を叶えてくれるのが、ドラえもんの道具「バイバイン」である。このバイバイン、たった一滴かけるだけで五分間ごとに累乗でモノが増えていくという優れたもの。原作では、のび太君が増え続ける栗まんじゅうを処理しきれず宇宙に投棄するといったオチなのだが、リスクがある反面、実に夢のある道具である。現在の技術力をもってしたらこの夢を叶えられるのではないか。理系分野に関してまだまだ浅学ではあるが、物理法則の観点から「バイバイン実現計画」が可能であるか考察していくことにする。

### 【細胞分裂作戦】

現実に起こっている現象になぞらえて考えれば実現も夢じゃない。栗まんじゅうが累乗に増えていくこの現象、どこかで見覚えはないだろうか。真つ先に思い浮かんだのは、中学生の時顕微鏡のレンズ越しに見た「細胞分裂」である。一つの細胞が分裂して二つになり、各々が元のサイズまで大きくなれば栗まんじゅうは実質二倍になったといえる。しかしこの実現には大きな障壁がある。それが「質量保存の法則」。化学反応の前後で、物質の質量は変化しないという物理界の鉄の掟だ。一見これに反しているように見える細胞分裂の過程であるが、分裂した細胞が元の大きさに戻るまでに周りの養分を取り込んで成長しているため、しつかりと法則にのっとっているのだ。では栗まんじゅうはどうか。残念ながらこの栗まんじゅうは無生物。分裂して二つになったとしても、周りから養分を取り込み、そこから成長する仕組みを持っていないのだ。その結果出来上がるのは細切れになったぼろぼろの残骸である。どうやら無生物である栗まんじゅうでの実現は厳しそうだ。

### 【増殖速度上昇作戦】

無生物を二つに増やす、といった方向性での実現は失敗に終わった。ならば妥協して、生物の場合を考えてみるのはどうか。バイバインは『五分ごとに』物体を累乗に増やす道具である。このハイペースな増殖周期の実現を目指すことにしよう。細胞の成長、分裂速度を上昇させる、といった効果を持つ物質・技術は、すでに地球上に存在している。

一つ目の案：「クロレラ」と呼ばれる物質。単細胞の緑藻類の一種で、当初はタンパク質を多く含むことから食料源として重宝された。しかしクロレラから抽出されるエキスが細胞の成長促進の作用を持つことが証明され、家畜の飼料に用いられている。

二つ目の案：レーザー光による照射。イモリの卵の胚細胞に低エネルギーレーザーを当て、細胞の分裂周期を早めるといったものである。実験の結果、断定するのは難しいがレーザーの照射によって分裂周期が早まると考えてもよいのではないかという結論が導かれた。

以上が私の提案する増殖速度上昇作戦の二案だ。

この二つの作戦を通して、生物の増殖速度を上げることができてもバイバインの完全再現は

不可能であると考えてよいだろう。したがってこの実現計画は失敗である。しかし、かえってこの結果でよかったのではとも考えられないだろうか。バイバインは生物、無生物問わず、物体を永遠に増やし続ける道具だ。仮に実現したとして、延々と増え続ける物体を制御するだけの力量があるのかと問われれば、首を横に振るしかない。

ドラえもんの道具は我々に無限大の夢を見せてくれる。しかし、リスクだつてつきものだ。この計画の失敗は、少年のころの夢を叶えるにはそれなりの代償と責任が必要だというメッセージなのかもしれない。

#### 参考

阿摩土孝…1987「低エネルギーレーザー光照射によるイモリの胚細胞に対する影響」『医用電子と生体工学』25 (1)

69・74

西土井睦…1967「クロレラエキスの細胞分裂促進作用」『栄養と食糧』20 (3) 190・193

## 雪の白やじ

中山 裕斗

カーテンの間隙からこぼれる朝のまぶしさに目を細め、外を覗く。一面に広がるは光のステージ。大地を白銀に染め上げ、冬の到来を報せるそれは、わたしの眼にひどく奇麗に映った。と同時にわたしのなかに小さな疑問符の種子を残していった。種子は眼前の不思議な光景を養分にすくすくと育ち、やがてひとつの問いと成る。なぜ雪は白いのか。

雪の結晶をスケッチするとき、多くの人は透明を水色で代用している。薄黄色がかった硬質の画用紙の上に空色のクレヨンをはしらせ、冬の思い出と題して雪の結晶を描いた。こども時代の記憶は今も鮮明に残っている。表しがたい色、透明の象徴ともいえる水の色が集まって白を構成している。なぜだろう。色とはいったい何ものなのか。

わたしたちは、青い空、濃緑の森、オーシャンブルーの海、眩い白雪などと、カラフルな世の中で生活している。しかし、青という色は天空についたものでもなければ、雪の白さは雪そ

のものが持つている性質でもない。空の気は、人間が青と感じる波長の光を多く散乱させ、雪は人間が白と感じる波長の光を多く反射させているにすぎない。かの物理学者アイザック・ニュートンは著書『光学』のなかで、「光線には色がついていない」という言葉を残している。これは色というものは光線が眼に入り、大脳の感覚領域に刺激が伝えられた時に初めて生じる感覚であつて、光線はそのような感覚を生じさせるきっかけを作っているにすぎないということとを述べたものである。ニュートンの言葉を借りれば、色は人間の脳の想像上の産物ということだろうか。なんとも悲しいものである。

水の粒は透明である。同様に雪の結晶も透明である。雪の結晶一つひとつと空気とのあいだで屈折と反射が起きて、結晶中を様々な方向に向かうため、雪の塊全体では表面で乱反射が起きるように見える。このために雪は光を通しにくくなり、透明ではなくなる。結果的に、雪はすべての光を反射して眼に届き、すべての波長の光を合わせた『白』が見えるということらしい。色の三原色をすべて合わせると『白』が作られるように…。電脳世界では red が #FF0000、green が #00FF00、blue が #0000FF である。そこから生み出される white が #FFFFFF と表記されるように…。

可視光の波長は確かに存在する。これは紛れもない客観的事実である。そして、電脳世界ではカラーコードのように色は記号で表記され、共通の意味をもつ。しかし、人間世界においては、同じ光の波を見ても人や文化によって『見える』色は異なる。先ほどふれたニュートンは「虹は7色である」としたが、彼の生まれたイギリスでは虹を6色に『見て』いるようだ。日本に生まれ、日本語の荒波にもまれて育ったわたしは、日本語という色眼鏡を通して虹を7色に色分けしている。しかし、色を表す言葉知らない人は虹を何色に『見て』いるのだろうか。わたしは自分の色眼鏡でこの雪を『見て』いるが、この白さはわたししか感じられないのだろうか。厳寒の白銀の世界に一人取り残されたような気がする。眼前のそのままの光景を伝えることができない。まさしく雪のように儂いものだ。

わたしの疑問符の種子は問いへと成長し、結論の花を咲かせた。しかしながら、物理学の世界はなんと奥が深いもので、深層へ行けば行くほど疑問符は生まれてくる。冬が過ぎれば春が来る。わたしのなかの尽きない疑問符の種子はやがては花を咲かせられるのだろうか。

参考

- 左巻健男…2001 『光と色の100不思議』東京書籍 18・26  
江本康文…1979 『色とおいの科学』朝倉書店 1・4

ある夏の昼過ぎのことでした。粗末な昼食で満たされた胃袋の重さに耐えかねて、私は怠惰にもソファアの上に横になってぼんやりと外の景色を眺めていました。空一面の曇天にもかかわらず、庭の芝生は相変わらず青々としていました。遠くに見える水田では、また若い苗が健気に、不安定な泥土の上で風に吹かれています。私はその苗たちを可愛らしいと思いました。しばらくすると、水面に波紋が立ち始めました。雨が降り始めたのです。雨が私をそうさせたのか、あるいは私の飽き性で怠惰な元来の性質からかはわかりませんが、雨が降り始めた途端、私の中の外を眺めることに対する気力は完全に失われてしまいました。私はソファアの上で横になりながらスマートフォンを使いはじめました。怠惰な自分を認識し嫌悪しながら、一方で何をする気にもなれません。こんな時、私は決まって天候のせいになります。

突然でした。窓から閃光がやってきて私の部屋を包んだかと思うと、まるでいたずらをする

る子供のように、一目散に逃げていきました。いたずら好きな子供を怒っているのでしょうか、立て続けに、今度はおどろおどろしい声が聞こえてきました。それは確かに雷鳴でした。私は周辺の空が雷を生じやすい状態にあることを推測しました。こんな時の私は決まってお稲妻を見ることに躍起になります。稲妻はなかなか見えませんが、雷鳴は数分おきに聞こえてきました。私の耳や脳内に、「ゴロゴロ」というはつきりとした音がしばらく残ります。妙な感覚です。しかし、私はこの妙な感覚が好きなのでした。私は雷鳴の音を聞くたびに、その擬音を「ゴロゴロ」と表現した人を天才だと思うのです。私にはもう雷の音を「ゴロゴロ」以外の音として認識することは金輪際できないでしょう。「ゴロゴロ」している雷鳴の響きを楽しんでいる私もまたソファーの上で横になって「ゴロゴロ」しているのです。もしかしたら雷もまた私のように怠惰な存在なのかもしれません。昔テレビで見たコメディアンたちの演じる雷様は、確かに怠惰な様子であったことを思い出しました。

そんな他愛ないことを考えていると、私の興味は雷そのものに対して向けられるようになりました。なにか得体のしれない不吉なものを予感させる、この神秘的な電流について私はその原理を知りたいと思いました。ちょうどスマートフォンという便利な検索ツールを手

していた私にとって、その原理を調べることは容易でした。小難しい物理学の話に辟易しながらも、私は雷様の正体をつきとめました。その正体は、発達した積乱雲の中で氷の粒が生み出す電荷によって雲の中から地表へ追いつけられる可哀そうな電子たちなのでした。氷の粒があまりにも頻繁に衝突しあうがために、望まずとも自身の電場が強大になりすぎたために、空気の絶縁を破壊し追いつけられる、不遇な電子たちなのでした。その境遇はありきたりな物語に登場するような、超能力を得てしまったがために周囲から疎まれる主人公のようです。雷様は、孤独で悲しい、哀れな存在なのでした。あの目を突き刺すような凄まじい稲光は、地表にたたきつけられる前の最後の輝き、せめて鮮やかに散ろうという意思の表れでしょうか。あのおどろおどろしい雷鳴は、自身の境遇を嘆き、悲しんでいるのでしょうか。あの勇壮な稲妻からは想像もできないほど哀れな存在が、今日もどこか上空で生まれては地表で散っているという事実を、私は知ったのでした。

雷に関する残酷な現実には、ただでさえ雨でふさいでいた私の気分をさらに憂鬱にしました。稲妻がギザギザしているのは、地面にたたきつけられる恐怖のために逃げ道を探しているからでしょうか。雷が高いところに落ちやすいのは、雷自身が少しでも落下時の衝撃を軽

滅しようとしているからでしょうか。少なくとも私にとつての雷は、空気の絶縁性や高低差によつて生じる電場の強弱などの物理法則とは無関係であつてほしいと思ひました。私自身、心の奥深く、私の中に残る自然にまで訴えかけてくる雷には、どこか親しみを感じているのでしよう。確かにそれは物理法則に則つた機械からは感じ得ないぬくもり、私自身も大自然の一部であることを思い出させるような、言うなれば「自然味」を帯びているのです。

やがて曇天とともに雷様はどこかへ行つてしまいました。空はさつきまでと打つて変わつて青く冴え渡つていました。水田では、苗たちが相変わらず上空に向かつて真つすぐに伸びていました。その凜とした様子は、その苗たちの、未来へ向かう力強さを感じさせるのでした。私は風によつて遙か遠くへ運ばれてしまった曇天の方向を眺めました。苗たちの元氣な姿に目を細めながら、今も絶えずどこかで生まれている、未来に向かつて真つすぐに進むことのできない悲しい存在に思いを馳せるのでした。

音の電機工業：「雷が発生するしくみ」[https://www.otowadenki.co.jp/knowledge\\_mechanism/](https://www.otowadenki.co.jp/knowledge_mechanism/)（2022年1月11日閲覧）

トリビアーノ：「なぜ雷はギザギザ、ジグザグに曲がりながら落ちる？ 音が鳴る理由」『トリビアーノ』<https://tivia-japan.net/7489.html>（2022年1月12日閲覧）

## 電子レンジは本当に体に悪いのか？

池田 瑛人

はじめに

4月から始まったひとり暮らしの新生活。当たり前のように電子レンジを買おうとした私に、母はこう言った。「電子レンジは体に悪いからやめなさい。」

結局、母にバレないよう電子レンジを買った私だったが、果たして本当に電子レンジは体に悪いのだろうか。物理学の観点も用いながら検証する。

### 電子レンジの仕組み

まずは、慣れないが、理系っぽく電子レンジの仕組みを概説しておこうと思う。電子レンジのエネルギー源は、電波（電磁波）である。これはマイクロ波とも呼ばれる。しかし、この電波は人間の肉眼では確認することができない。目には見えない電波、それが食品に含まれてい

る水の分子などを振動させ、摩擦熱を生じさせる。この摩擦熱が広がって、食品全体をあたためる。電子レンジの仕組みを簡単に説明すると、こんな感じである。

ただ、ここでひとつ疑問が生じる。なぜ、電子レンジは食品の入っている器やケースを温めずに、内側にある食品だけを温めることができるのか。

その答えには、やはり電波の持つ性質が大きく関わっている。電子レンジのエネルギー源である電波だが、人の目には見えないという特徴のほかに、実は三つほど性質がある。一つ目は、直進し、水分を含んだ物質に吸収されて発熱する性質。電子レンジの加熱はすべてこの性質を利用してのものである。二つ目は、陶器やガラスなど、水を含まない物質を透過する性質。そして最後に三つ目が、金属にあたると反射する性質。この三つ目の性質があるため、金属製の容器を用いて電子レンジで加熱をしても、容器の中の食品は温まらない。

## 電子レンジは体に悪い論者の言い分

ここからは、より本格的に、本エッセイの主題である「電子レンジは本当に体に悪いか」と

いう事について、まず先に、電子レンジが体に悪いという論者たちの言い分を紹介しよう。

電子レンジが体に悪いとする人々が論を展開する際に必ず持ってくるもの、それこそ、何を隠そう、前項「2. 電子レンジの仕組み」で述べていた「電波（電磁波）」、つまり「マイクロ波」である。

電子レンジは体に悪いという意見は、大きく分けて、次の二つの不安から来るものだと考える。一つは、人体に関する不安。もう一つが、温めた食品に関する不安。

そして、さらにこの二つそれぞれで言うならば、人体に関する不安には、マイクロ波が健康を害する、発がん性がある、有害物質を取り込む可能性があるという意見があるだろうし、温めた食品に関する不安には、マイクロ波は栄養素を殺す、毒素が出てくる、一緒に温めたプラスチック容器の有害物質が付着するといった意見があるだろう。

いずれにせよ、電子レンジが体に悪いとする論者たちの言い分の支えとなっているものは、電子レンジに使われている電波（電磁波）が人間の体に害である、というものだ、ここでは

定義しておく。

## 反論

では次に、ここからは、前項で紹介した電子レンジは体に悪い論者たちの言い分に対して、できるだけ科学的に、反論していきたいと思う。

何度も登場している、電子レンジのエネルギー源、電波（電磁波）であるが、それは様々な性質をもち、その一つに、水分を含んだ物質に吸収されて発熱する性質があることは、「2. 電子レンジの仕組み」の項で説明した通りである。ここから派生して言うと、電子レンジが放出する電波（電磁波）は、いろいろな電磁波のなかでも特に水と相性がいいということである。そして、人体の60〜80%は水であるため、健康に害を及ぼすのではないかと言われる。しかしながら、これについて反論したい。そもそも、電子レンジのエネルギーとされる電波（電磁波）は、マイクロ波と呼ばれ、波長が比較的長く、生体への影響が少ない部類に入る。ただし、ここで断っておかなければならないのは、かといって絶対に無害であると言い切ることも

できないことである。電磁波は調査自体が非常に難しく、私が調べた限り、生体に有害である。無害であると断言できるような調査・研究結果がないのが現状である。しかし、電子レンジで温めた食品を食べ続けても健康を害さないことは、ネズミを用いた実験で証明されているところである。電磁波が生体に与える影響についての調査・研究は現在も継続中である。今後の研究結果なども見ていくことが大切と言える。

また、電子レンジの放出するマイクロ波が食品やプラスチック容器に影響を与えるとの考えから、発がん性を心配する意見がある。これについても、反論したい。簡単に言えば、マイクロ波は食品を変質させたり、毒素を発生させたりするものではない。電子レンジでプラスチック容器が溶けることがあるにはあるが、あれはその容器が電子レンジ非対応だからである。「電子レンジ可」の表記がある耐熱容器ならば、まず溶けないと言ってよい。さらに言えば、そもそもプラスチックは人体に無害な材料で基本的にできています。加熱によって変質するといった不安や毒素を出すといった心配も無用である。もし溶けたプラスチックが付着した食品を食べても、消化吸収されずそのまま体外へ排出される。

そして、電子レンジを製造する段階において、当然ながら、消費者の安全を守るための法規制も存在している。

### おわりに

ここまでの検証と論のぶつけ合いを踏まえ、最後に私の意見を簡潔に述べておく。

「電子レンジは、おそらく体に悪くない。」今であれば、そう母に反論できたのかもしれないと思いを巡らせながら、今日もまた電子レンジを使う。

…むしろ、使い過ぎで事故や故障が起きないかを心配しよう。

### 参考

板倉聖宣・松田勤… 2006 『電子レンジと電磁波―ファラデーの発見物語』 仮説社

## 真っ暗

田村 碧慧

目を閉じて歩いたことはあるだろうか。私の大学には約2 kmのまっすぐな道があり、興味本位で目を閉じて歩いてみたが、20 mも進まないところで我慢できずに目を開けてしまった。すれ違う人、車の音、地面に落ちている石や木の枝など、目を開けていれば当たり前なのが、目を閉じるというたったひとつの単純な操作で、一瞬にして恐怖の対象へと移り変わった。さらに、視覚が失われて聴覚が敏感になるせいか、目を開けた状態では聞こえなかった音まで耳に入ってくる。このエッセイでは、このような現象が起きる理由及び解決策を文系の私が、あえて物理学的な目線から考えていこうと思う。

「歩くこと」と「物理学」に大きく関係する言葉といえば、まずは摩擦力が思い浮かぶだろう。摩擦力とは、簡単に言えば地面に置かれた物体を動かすときにそれを邪魔しようとする力のことだ。基本的に地面はコンクリートなので目を閉じていてもそれほど恐怖の対象には入らないが、私が目を閉じて歩いたときの季節は冬で、しかも場所は北海道であったため、地面は

雪に覆われており、非常に滑りやすい道になっていた。目を開けていても脅威となるこの地面をわざわざ目を閉じて歩いたのだから、恐怖にならないはずがない。

次に、「目を閉じること」と「物理学」に関係ありそうな言葉として、光を挙げてみよう。人間は、光を角膜の後ろにある水晶体で屈折をし、網膜で像を結んでいるらしい。人間の五感による知覚のうち、8割以上は視覚からの情報だといわれている。そのため、目を閉じると残りの2割の情報しか入ってこず、情報不足で恐ろしいと感じてしまう。先の見えない未来や、自身の語学力が不十分な状態で外国人と会話するときの恐怖と同じようなものだろう。また、音も徒歩と物理の両方に関係している言葉だと思う。先ほども述べたように、目を閉じると聴覚が研ぎ澄まされ、目を開けた状態では感じなかった音さえ伝わってくる。そしてその得体のしれない音を自分の勝手な想像で恐怖の対象へと作り変えてしまう。以上の点が、目を閉じた状態での直進を妨げる原因となるものだ。

では、盲目の方々はこのような恐怖をどのようにして乗り越えているのだろうか。盲目の方々は目が見えないことをほかの感覚で補完しながら生活している。ここでまず押さえておき

たいところが、視覚が失われているからといって、ドラマや漫画で時々描かれるように聴覚や触覚などの感覚が超人的なほど発達しているわけではないということだ。つまり、視覚がなくなったとしても基本的な生活はできるのだ。逆に健常者は目から見える情報に頼りすぎてしまっている。見えてしまうせいで勝手に誘導され、見えない部分に気づけなくなっているのだ。視覚から解放されて新たに学ぶことはたくさんある。

目に見える人と見えない人が共存しやすい社会をつくりあげるといって、まるでシャツについたシミのように頑固な課題をキレイにするためには、どのような解決策という名の漂白剤を用いれば良いのだろうか。

#### 参考

伊藤由紗…2015 『目が見えない人は世界をどう見ているのか』光文社

## 結露 vs カビ vs 俺

田中 芳樹

少し寒くなってきた11月、新学期が始まったにも関わらず快適な一人暮らしの中、誰にも文句を言わずに干物のように家でゲームをしていた。すると急に足裏でひんやりとした感じがする。飲み物をこぼしたと思った。靴下を脱ぎティッシュを取り出して驚いた。水源は家に一つだけある窓だった。半月ほどカーテンを閉めたままにしていたためすごくいやな予感がしてカーテンをおそろおそろ開けてみると窓の下に水があふれ出ており水だらけになっていた。何より私を驚かせたのはカビたちでかなりの黒カビと白カビたちがいて目を疑った。初めて見た光景だった。

水の発生原因は「結露」で石川県出身の自分にとって北海道の結露は驚く量だった。窓の結露によって発生した水がカビを発生させ窓付近のフローリングは混沌としていた。カビたちを掃除し終わってからのことを「文系のための物理学」で取り上げてみようと思いいこの機会に結露とカビの発生について文献より調べた。

結露は空気中の水蒸気が比較的冷たい固体の表面で水滴となることで、空気中の温度や湿度により決定される露点温度(例えば温度 20℃、湿度 50%の空気における露点温度は 9.6℃)よりも低い温度の表面に起きる。

私の部屋の環境は温度が 21.6℃、湿度が 60%となっているため露点温度は 12℃となる。いくら二重窓とは言えさすがに窓は 12℃を下回るため結露が発生していた。そこで問題となるのはなぜ水があふれてきたかについてだったため、自分の部屋で実験を試みた。

普通窓は結露が発生しても窓のサッシには結露を受け止めるところがあるためにフロアリングには流れないようにしている(写真)。しかし見ての通りフロアリングには水がいつぱいになっており先月掃除したにもかかわらずカビがちらほらいる。しばらくカーテンを閉め切って生活してこのことが発生したことからカビを掃除してカーテンを開けっぱなしにしてみた。驚いたことに結露が流れ出すことがなくなった。試しに三日程カーテンを閉めておいたところ写真のようにカビが発生していた。原因が分からずおもむろにレースカーテンを触ってみると結露の水がレースカーテンをつたってフロアリングへと運ばれていた。



拍子抜けだった。私の生活スタイルによくカーテンにはぶつかるがまさかそのために水を運んでいたとは思いもしなかった。私のレースカーテンはポリエステル100%なので水をよくはじいて運んでいた。備え付けのレースカーテンでこのことが起きたことには少し憤りを覚えた。

次にカビの発生について調べてみた。カビの発生に必要なものは「栄養」「水分」「湿度」「湿度」が必要らしくどれか一つでも欠けたら発生しないそう。栄養には髪の毛や人のアカなどが含まれているらしく汚い私の部屋ではその条件が整ってしまっていた。自分の力で防ぐことができることとしては「水分」になるそう。自分の部屋に水があつたらこまめに掃除することを勧める。

怠惰な私の家では再びカビたちが快適そうに暮らしている。

参考

井上真由美：1996『やさしいカビの基礎知識』オーム社



物理学エッセイ

2022年2月8日

著者 文系のための物理学2021受講生

編者 川本思心

北海道大学 大学院理学研究院 物理学部門・准教授

(理学院 自然史科学専攻 科学コミュニケーション講座)

<https://ssn.cambria.ac/>





ssn文庫