

【表題】虹を追いかけて

【著者】山本明利 神奈川県立湘南台高等学校, 252-0805 藤沢市円行1986番地

【抄録】

Y P C (横浜物理サークル)は月一度の例会と会報発行を軸に、インターネットのWebページを通じた情報発信、メーリングリストなどの活動を行っている。本稿ではY P Cの「虹」をテーマにした一連の取り組みを振り返って、光学単元の実験教材開発について総括する。

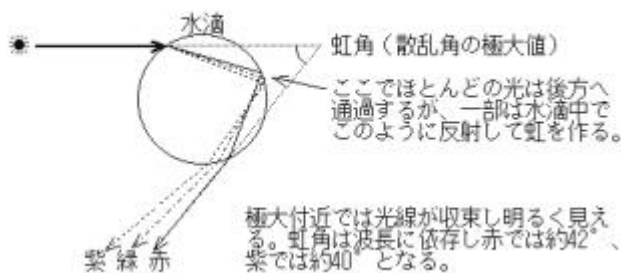
【キーワード】虹、波動、光、屈折、干渉

I . 水滴による光の分散と虹の原理を示す演示

1 . はじめに

虹は美しい大気光学現象であり、光の物理の恰好の教材である。虹の原理については参考文献 1) ~ 3) のような良書があり、本誌の読者には改めて解説する必要はないと思うのでここでは省略する。ここでは虹の物理の入り口として、図1に示すような水滴による光の分散を効果的に演示する簡単な実験を紹介する。

【図1】水滴による光の分散



2 . 準備

本実験には中村理科工業の光学用水槽 (RT-100N) を転用する。同装置の円形水槽にいっぱいまで水を満たして空中を落下する水滴に見立てるのである。

まず装置のランプハウスの支点のボルトをはずし、このボルト穴と適合する穴のあいた定規 (30cm) などとランプハウス支柱を、適当なボルト・ナットで直角に結合する (図2)。定規はある程度厚みがあり、しなりにくいものがよい。準備はこれだけで、特別な工作を必要としない。

電源は同装置の直線フィラメント電球に適合する6V程度の電源であれば交流・直流を問わない。スライダックでも実用になる。光源が明るい方が演示効果が高いがフィラメントを焼き切らないように注意する。

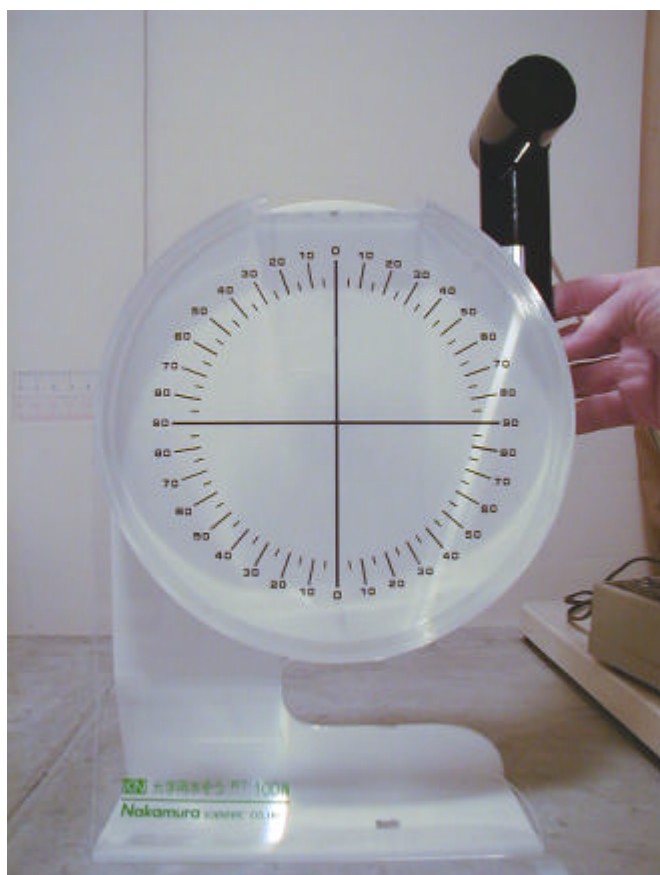


【図2】ランプハウスの付け替え方

3 . 演示の方法と教授ポイント

実験方法については、図3、4をご覧いただければ多くを語る必要はないであろう。定規を支点のボルトに引っかけるようにしてスライドさせ、ランプハウスを平行移動させる。

部屋を暗くすると、スリットを出た白色光線が屈折して水中に入り、円形水槽の内側で反射したり、再び屈折して水槽の外に出ていったりする様子が一目瞭然である。

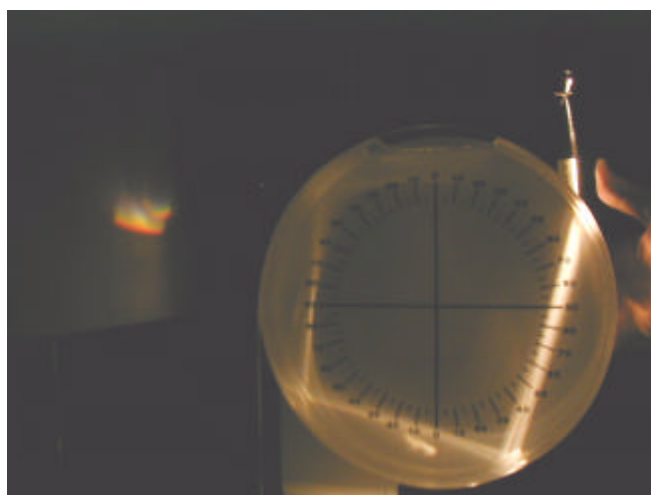


【図3】光学水槽にはいっぱいまで水を満たす

る。水中で一回反射して外に出る光線の進路に適当なスクリーンを置けば、分光した光の帯が投影される。赤の虹角がより大きいことも一見してわかるが、黒板用コンクリンを置けば、分光した光の帯が投影される。赤の虹角がより大きいことも一見してわかるが、黒板用コンパスなどを当てて角度を測定してみせると定量的な実験となる。

虹の原理において重要なポイントは、水滴の中心を通る位置から水滴をかすめる位置まで、入射光線を平行にずらしていくときに、図1の虹角に極値を持つことである。すなわち赤の光線は約 42° で極大値をとり、そこに光が集中して明るく見える。虹が見えるのは色ごとにこの極大値が異なることによる。この実験では入射光線の位置を連続的に変えることができるので、上記のポイントを示しやすい。

従来よく行われていた丸底フラスコによる実験では、光線の入射位置を変えての実験は難しかった。またアクリル円柱などを用いる同種の実験は、大勢で観察する演示には向かなかった。本実験では手軽な装置でこれらの点を改善している。



【図4】水中での光路とスクリーンに映ったスペクトル

参考文献

- 1) 西條敏美：虹 - その文化と科学，恒星社厚生閣(1999)
- 2) 小口高，渡邊堯訳：太陽からの贈りもの，丸善(1992)
- 3) 斎藤文一，武田康男：空の色と光の図鑑，草思社(199
- 5)

11. 教室内での虹観察に適した「虹スクリーン」

1. 虹スクリーンの歴史

虹は授業にあわせて都合よく出てくれるものではない。霧吹きや撒水機による虹も、晴れている日を選び野外活動をしなければならないという面倒があった。虹を教室内に持ち込み、随時手軽に観察できるようにする教材の試みが、名城大学内川英雄教授、鳥取大学附属中学校浜崎修教諭らによってなされ、水滴をガラスやプラスチックの微小透明球に置き換えた「虹スクリーン」が考案された¹⁾。

ことに直径約0.2mmの透明プラスチック球「虹ビーズ」を用いる虹スクリーンは、1995年科教協の大会で取り上げられたのを機に注目を集め、浜崎氏とのNIFTY-SERVEの【理科の部屋】での交流を通じて爆発的に全国に広まった。YPC（横浜物理サークル）もこれに呼応して教材化研究を行い^{2) 3) 4)}、「青少年のための科学の祭典」等において精力的に啓蒙活動を行った⁵⁾。YPCの一連の取り組みにより開発・整理された虹関連の実験教材は文献6)に集大成されている。

全国の理科教員の熱い要望に応じて、1997年からは中村理科工業株式会社が「虹ビーズ」と「虹スクリーン製作キット」の販売を開始し、材料の安定供給への道が開けた。以来、虹スクリーンは理科教材として定着したのである。

2. 虹スクリーンの製作

虹スクリーンは子供にも簡単に製作することができる。以下、浜崎修氏の製作法を基本として、YPCが「虹のトンネル」用に量産して培ったノウハウを解説する。

まず、次の材料を用意する。

- ・虹ビーズ（中村理科工業 D20-1406-01, 700g ¥2500）
- ・スプレー糊（3Mの77タイプがよい）
- ・黒い紙（ラシャ紙、画用紙等）
- ・古新聞、作業用シート等

紙の大きさは任意だが、小学生に作らせるならA3版程度が作りやすい。しかし、「虹のトンネル」の製作や、後述する人工虹の探求活動のためには、できるだけ大きなスクリーンを製作することが望ましい。以下では模造紙大の大型スクリーンを想定している。製作の手順は以下の通りである。

(1)床に作業用シートなどをしく。（こぼれたビーズを受けるため。）

(2)別の場所に新聞紙をしく。（スプレー糊で床を汚さ

ないようにするため。）

(3)新聞紙の上に黒い紙を置く。

(4)20cmぐらい離れたところから、黒い紙にスプレー糊をむらなく吹きつける。横に往復、次いで縦に往復するように塗布して二度塗りするとむらを少なくすることができる（図1）。

(5)黒い紙を作業用シートの上に移す。

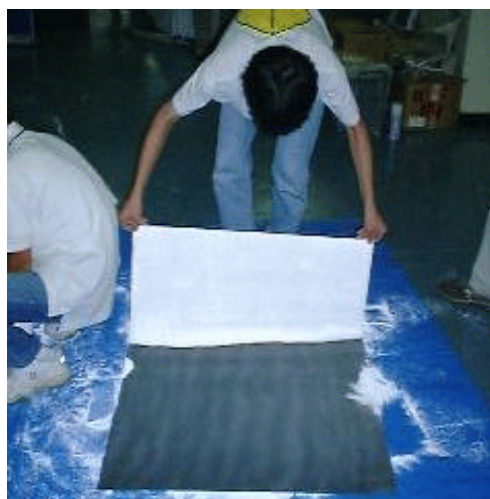
(6)虹ビーズをまんべんなくふりかける。適当にばらまいたあと、黒い紙の一边を手で持ちあげ、虹ビーズを転がすようにしていきわたらせる（図2）。

(7)黒い紙を立てて、浮いているビーズを落とす。

スプレー糊を使用するので、大量生産する場合は、換気のよい場所を選ぶ必要がある。また、ビーズが目に入ると角膜を傷つけるので注意する。作業用シート上のビーズは回収して再利用できる。床にビーズが散ると非常によくすべるので、散ったビーズは掃除機でよく吸い取る。



【図1】スプレー糊をむらなく吹きつける



【図2】紙の一边を持ち上げ、ビーズを行きわたらせる



【図3】虹スクリーン上に現れた人工虹

3. 人工虹の観察

虹スクリーンができれば、さっそく光源を用意して人工虹を観察してみよう。光源はやはり太陽がベストだが、室内ではスライドプロジェクターやOHPなどで代用できる。100W程度の裸電球を用いてもよいが、必ずクリヤー球(ガラスが透明ですりガラスになっていないもの)を使用し、できるだけフィラメントが短いものを選ぶ。点光源に近い方が鮮やかな虹が見える。電球ではやけどに注意する。工事用のハンドランプを使用すると安全である。

明るい光源を背にして虹スクリーンを眼前にかざすと、自分の頭の影を中心に後光のような虹の輪が見える(図3)。外側が赤、内側が紫になることや、輪の内部が明るいことなど、つかの間の天然虹ではなかなか気付かないこともつぶさに観察できる。これらは授業でまず強調したいポイントである。

虹ビーズは水滴より屈折率が大きいため、虹角が小さくなり、天然の虹より小振りに見えることにも気がつかせたい。後光のような人工虹は、いわゆるブロッケン現象に似ているように見えるが、原理は全く異なるので注意する。ブロッケンの虹は光の回折の結果である。

虹ビーズは比較的粒径がそろっているため、過剰虹の観察にも適している。過剰虹は主虹の輪の内側に現れる干渉縞である。過剰虹については浜崎氏自身が詳しいシミュレーションを行っている⁷⁾。

ろうそくやペンライトのような小さな光源を虹スクリーンの前にかざすと光源を取り囲むように虹が見える(図4)。まるでシャボン玉のように光の球が空中に浮かんで見える。神奈川・柏陽高校の右近氏が「3D立体虹」と呼んだ幻想的な現象である³⁾。左右両眼が虹を見る位置にわずかなずれを生じることによる疑似立体効果

である。

さらに、比較的明るい点光源を目の横に置いて虹スクリーンの近くに立ってみよう。楕円のようないびつな形をした内側が暗い虹が見えるだろう。しかも、色の順番が逆になっている。筆者はこれを「裏虹 reverse bow」と名づけた²⁾。裏虹の観察のためには広いスクリーンが必要である。多数の小型虹スクリーンを壁一面にすきまなくはりつけてもよい。

目と光源の位置関係で虹は激しく形を変える。立体虹も裏虹も点光源による人工虹特有の現象で、天然の虹では決して見ることはできない。このことについては、稿をあらためて詳述する。



【図4】点光源を取り囲む「立体虹」

参考文献

- 1) 内川英雄、浜崎修、国田徹也：人工虹の研究，第12回東し理科教育賞受賞作品集(1981)pp.68-71
- 2) 山本明利：点光源による人工虹の理論，物理教育通信，84(1996)pp.9-15
- 3) 右近修治：3D人工虹，物理教育通信，84(1996)pp.16-17
- 4) 山本明利：「虹スクリーン」で教室に虹を，理科教室，41-5(1998)pp.64-67
- 5) 山本明利：虹のトンネル，'96～'98青少年のための科学の祭典実験解説集
- 6) 平野、花岡、喜多、右近、山本：虹をつかもう，科学の祭典CD-ROM「原子の世界へ旅立とう！」PART.3，科学技術振興財団・科学技術館(1999)
- 7) 浜崎修：過剰虹の実験とマイコンによる計算，物理教育，31-4(1981)pp.197-200

111. 総合的な学習の課題としての人工虹

1. 点光源による人工虹

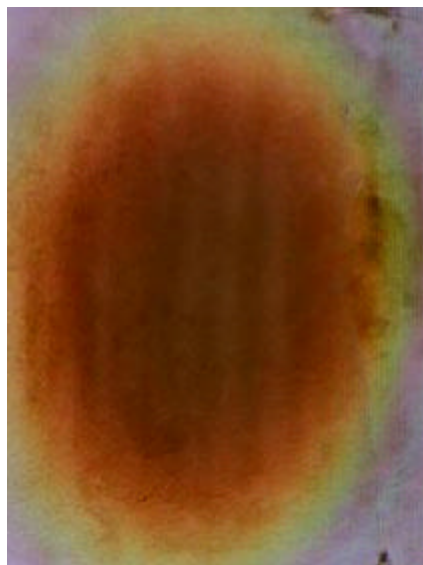
IIで紹介した虹スクリーンは太陽光のような平行光線またはOHPなどそれに近い光源のもとで、天然の虹を模擬することもできるが、点光源を用いるとより発展的な扱いが可能になる。このとき生じる人工虹は、平行光線によって生じる天然の虹では見られない興味深い振舞いをする。点光源によって虹スクリーン上に生じる人工虹の見え方は、「虹トラス」の概念によって統一的に説明されている¹⁾。以下ではその概要と学習課題としての可能性について述べる。

点光源のもとで観察される人工虹は、小・中学校はもとより、高等学校の理科の探究活動や総合的な学習の教材としても活用し得る話題を豊富に含んでいる。

2. 裏虹の発見

フィラメントの短い電球(100Wクリヤー電球等を使用、すりガラスの電球は不適)のような点光源で虹スクリーンを照らし、視点をいろいろに変えて観察すると、虹は必ずしも円形ではなくなる。点光源を虹スクリーンから離して、両者の間に視点を設けると、太陽光による普通の虹と似た位置関係になり、正常な虹が観察できる。点光源を虹スクリーンに近づけてその背後のから観察すると、電球をとりまくように「立体虹」虹が見えることは前述した²⁾。この虹も赤が外側の正常な虹で、虹輪の内側が明るいのも普通の虹と同じである。

ところが、虹スクリーンから30cmほど離して電球をおき、目と電球をスクリーンに平行に配置して、頬が電球



【図1】裏虹(内部が暗い)

の熱を感じるぐらい光源と目を近づけていくと奇妙なことが起こる。赤が内側、紫が外側になったいびつな虹の輪が見えてくるのである。しかも中心が暗く外側が明るい・・・ちょうど正常な虹を内外裏返した感じであるが、楕円に似た形で幅が広い

のが特徴である(図1)。観察にはできるだけ広い虹スクリーンを用いるとよい。

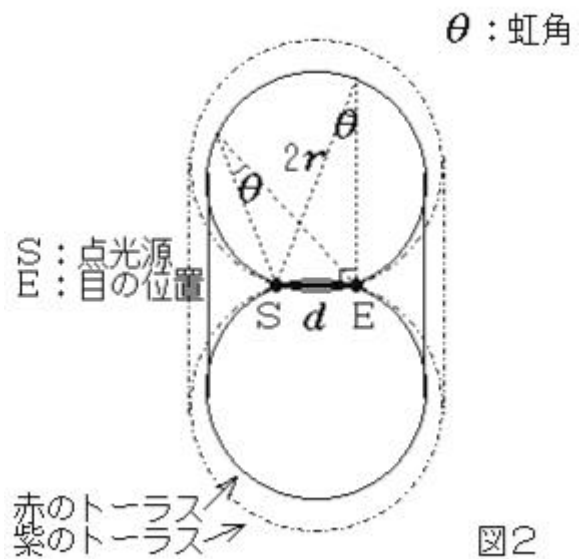
色の配置は逆順だが、これはいわゆる副虹(2次の反射光による虹)ではない。視点を移動することにより、前述の正常な虹から連続的に変化して裏返るのが見える。これは主虹と同じ種類の虹である。

以下ではこの裏返しの虹(赤が内側で紫が外側、赤の内部が暗い)を「裏虹 reverse bow」と呼ぶ。これに対し、天然に見慣れた赤が外、紫が内で内部の明るい虹をここでは「正常虹 normal bow」と呼ぶことにする。裏虹は正常虹と連続的に移り変わる1次の虹である。裏虹は太陽光のような平行光線では決して観察することはできない、点光源ならではの現象である。点光源による虹はどういう条件を満たして観測されるのだろうか。

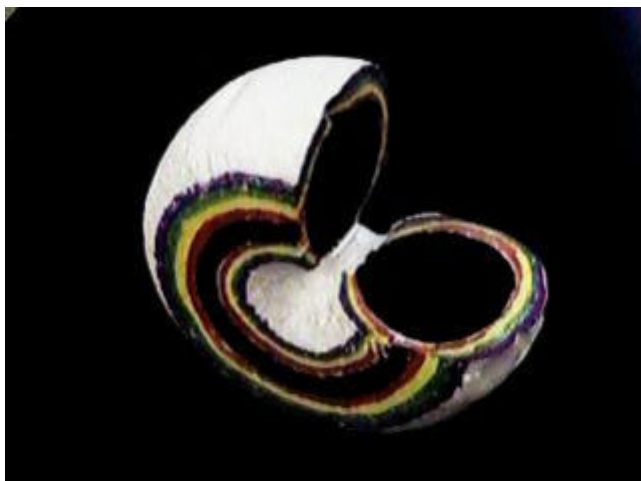
3. 虹トラス理論の概要

点光源を虹スクリーンから有限の距離に置き、光源・スクリーン・目の位置関係をさまざまに変えて人工虹を観察するものとする。図2で、Sを光源、Eを観察者の目とする。虹角 θ を満たす点の集合は、SEを含むある平面内では線分SEを弦に持つ円周上にある。いわゆる「円周角の定理」である。正確に言うと、弦SEに対する円周角が虹角 θ であるような円周上の点は、そこに虹ビーズがあるとき虹が見える位置になる。

実際にはこのような点は空間図形として分布していて、上記の円をSEを通る直線を軸にぐるっと回転させてできる「穴のつぶれたトラス」状(膨らんで中心のあながふさがってしまったできそこないのドーナツを想



【図2】虹トラス(回転軸SEを含む断面)



【図3】虹トーラスの立体模型と断面

像するとよい)の立体を形成する。これを「虹トーラス bow torus」と呼ぶことにする。図3は虹トーラスの外形と断面の立体模型である。

点光源が平面の虹スクリーンに作る虹の形を求める問題は、このトーラスを虹スクリーンという平面で切る時の切り口の形状を考えるという幾何学的問題に置き換えることができる。なお、この円の半径は虹角が色により異なるため、赤でやや小さく紫でやや大きくなるが、各円は必ずSとEで交わる。

図2で光源と目の距離SEを d 、虹角を θ とすると、円の半径 r は、

$$r = \frac{d}{2\sin\theta} \quad \dots\dots(1)$$

である。虹ビーズでは赤の光については虹角は約 17° であるから、 $\sin 17^\circ = 0.29$ により

$$r_R = 1.7d \quad \dots\dots(2)$$

同様に紫については虹角が約 14° であることから、

$$r_V = 2.1d \quad \dots\dots(3)$$

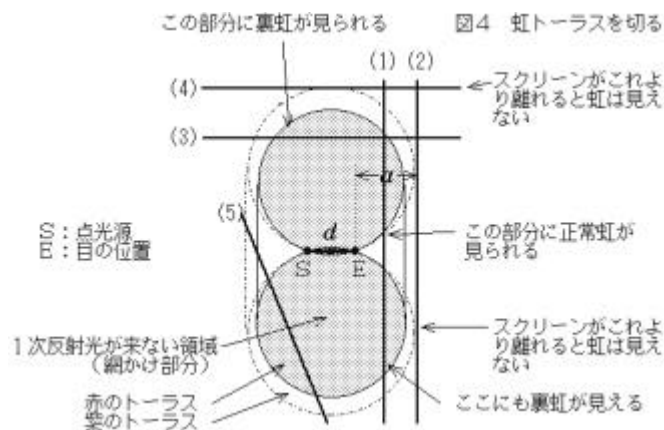
となる。虹トーラスのサイズはこうして決定する。

虹トーラスを虹スクリーンで切った断面が、観察される人工虹に相当することは上に述べた。この点について、より詳しく考察してみよう。

正常虹は図4(1)のようにスクリーンを配置した時に中心付近に円形に観察される。紫のトーラスとスクリーンの交線は赤のそれより内側にくる。つまり赤が外、紫が内側になる。正常虹はスクリーンが図4(2)の位置より離れると観察できない。図中 a で示す観察限界距離は虹ビーズの場合

$$a = r_V - 0.5d = 1.6d \quad \dots\dots(4)$$

与えられる。このような観察限界距離が存在すること



【図4】虹トーラスを切る

も点光源による人工虹ならではの事情である。なお、図形は左右対称だから、平面(1)を光源S側に持ってきても光源をとりまくように正常虹(立体虹となる²⁾)が見られる。

一方、線分SEに平行に、図4(3)のようにスクリーンを配置するとやはり虹が見えるが、このときは紫のトーラスとスクリーンの交線は赤のそれより外側に来る。つまり赤が内側の裏虹が観測されることになる。この場合もスクリーンが(4)の位置より離れると虹は見えなくなる。虹ビーズの場合は大まかに言ってこの距離は円の直径の程度である。したがって、式(2)(3)によれば、光源と目の間隔 d を10cm程度としたときは、虹スクリーンはそれぞれから40cm以内の距離になれば裏虹は見られないことになる。

さらに付け加えれば、赤のトーラスの立体内部の点は、SEを見込む角が虹角 17° を越えるので、この領域からは反射光はやってこない。したがって正常虹の内部は明るく、裏虹の内部は暗くなる。

図4(1)のような位置からスクリーンをしだいに傾けて(3)の位置までもっていく途中、例えば(5)のように斜めにトーラスを切る位置で、正常虹は連続的に裏返って裏虹の一部を構成するようになる。裏虹の裏虹たる所以である。

4. 学習課題としての人工虹

以上のように、点光源によって虹スクリーン上に現出される人工虹の振る舞いは、中学・高校程度の幾何学で容易に説明でき、数学の学習課題としてもおもしろい。もともと室内で手軽に虹を観察し、その原理を学べる理科教材として脚光を浴びた虹スクリーンだったが、こうして探求を深めてくると、物理現象と数学の密接な関係にも自然に気づくことになる。

自然との関わり、ミクロな機構でマクロな現象を説明する過程、光と色の物理、数学的に美しい原理・・・虹はもともと総合教材としての要素を豊富に秘めている。さらにいえば、虹の秘密を解き明かしてきたデカルト、ニュートン、ヤング、エアリーらの業績に綴られる科学史の流れや文化史的な興味など、虹の世界は奥が深い。このへんの話題は最近出版された文献3)に集大成されている。

新指導要領のもとで始まる「総合的な学習の時間」では、教科や教科書の枠組みを越えた課題学習が可能になり、また求められている。「虹」は上記の意味で総合的な学習のテーマにうってつけだと思う。虹スクリーンの人工虹も、おもしろ理科工作にとどめずに、さらに発展的な取り扱いを工夫してみてもはどうだろうか。光源・虹・視点を結ぶ角が常に一定(虹角)となることに実験的に気づかせるだけでも探求の糸口が開けるだろう。その先の話題は豊富にある。

本稿をしたためつつあった2000年4月、数学セミナー5月号に真島秀行氏(お茶の水大学理学部数学科)の「虹にまつわる数学」という記事が載った⁴⁾。数学に興味を持つ高校生を、虹の美しい写真と簡潔明快な解説により大学レベルの数学の世界へといざなう記事であった。氏は数学科の講義においても、虹スクリーン上に見られる過剰虹などを教材に学生の興味を喚起しておられるとうかがい、大変心強かった。

小学校で虹の美しさに心を惹かれ、中学校でその不思議の入り口にたどり着き、高校で数学的原理の美しさを知り、やがて大学での学問へと連なる・・・虹を追いかける総合的な学習はあながち夢物語ではないだろうと思う。

5. 取り組みを回顧して

筆者と虹ピースとのつきあいはNIFTY-SERVE【理科の部屋】での浜崎氏との劇的な出会いを機に始まった。以来、虹トーラス理論や虹のトンネルを生み出した人工虹の探求活動は常にYPC(横浜物理サークル)や【理科の部屋】の仲間と共に行われてきた。サークルの例会やパソコン通信を通じて情報交換しながら、実験を工夫し、推論し、議論をつみあげる中で、ここで総括してきたような教材が生み出されてきたのである。

「青少年のための科学の祭典・全国大会」での虹のトンネルの製作・展示を支援してくれた多数の生徒諸君の存在も忘れることができない。これらの仲間や生徒たちとの交流は、私にとってよい刺激であり元気のもとであった。本稿を閉じるにあたり関係の方々から感謝し

たいと思う。

YPCの虹を追いかけた取り組みの成果は参考文献5)に集大成してある。光の物理と幾何光学を実験で綴った教材集である。機会があればご覧いただきたい。

参考文献

- 1)山本明利：点光源による人工虹の理論,物理教育通信,84(1996)pp.9-15
- 2)右近修治：3D人工虹,物理教育通信,84(1996)pp.16-17
- 3)西條敏美：虹-その文化と科学,恒星社厚生閣(1999)
- 4)真島秀行：虹にまつわる数学,数学セミナー,2000年5月号pp.64-68
- 5)平野、花岡、喜多、右近、山本：虹をつかもう,科学の祭典CD-ROM「原子の世界へ旅立とう!」PART.3,科学技術振興財団・科学技術館(1999)