

高次の虹と虹色現象の再現実験

抄 録

本研究は高次の虹および虹色現象の人工的な再現を目的として行った。反射物の比較実験では、スチール板が最も強い反射光を示し、反射物の選択が虹の鮮明さに影響することが分かった。ビーカーを用いた実験により、主虹42度、副虹51度の反射角を確認したが、副虹の色反転などは再現されなかった。一方、水晶を用いた実験では主虹と副虹が再現され、副虹の色反転も観察された。さらに環水平アークの再現を目指し透明氷を生成したが、完全な透明度には至らず不完全な現象となった。これらの結果から、反射物の材質や反射角、氷の透明度が再現性に大きく影響することが示され、今後は高反射率素材の検討や透明氷生成の改良が課題である。

キーワード：虹、高次の虹、虹色現象、環水平アーク

1. はじめに

1.1 研究動機

普段よく見かける半円状の虹とは異なり、上下が逆さまになっている水平な虹（図1）を観察したことをきっかけに、虹に対する関心が高まった。

その際、虹は何重にも形成されることがあるのだろうか、また、半円状ではない形状の虹を作ることは可能なのだろうかといった疑問が生じた。



図1 環水平アーク
撮影日：2023.5.3
撮影場所：奈良県奈良市

1.2 研究目的

虹が水滴の中で反射してできる特性（図2）を使って水滴または水の模型を作り、高次の虹（※₁）または虹色現象（※₂）を人工的に作ることは可能なのかを知りたいと思ったため。

※₁高次の虹 水滴の中での反射回数に応じて生じた虹の名称

水滴の中でN回反射したものをN次の虹という

※₂虹色現象 高次の虹のような半円の形をした虹以外の虹色で生じる現象のこと

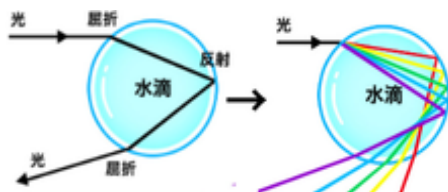


図2 水滴の反射による分光
CATALER化学Q&Aより引用

2. 文献調査

2.1 太陽光線について

太陽光線は7色の光が集まってできた白色光だが、水滴などの媒質で屈折をするときに白色光に含まれた光の色ごとに屈折率が異なるため7色に分光（図2右）される。それに

よって虹が発生する。

また、太陽は地球から約 1 億5000万km離れているため太陽光線は平行光線（図3）となっている。ライトなどの光は表面のガラスで乱反射をするため拡散光線（図3）となっている。

これよりこの実験で使用するライトには黒画用紙のスリットを入れ、平行光線を再現したもの（図4）を使用することとする。



図3 平行光線・拡散光線



図4 使用するライト

2.2 主虹・副虹について

水滴の中で二回反射したものを副虹、一回反射したものを主虹という。副虹は主虹の外に虹の色が反転して二重になってできる。また主虹は太陽高度が42度の時に対日点42度に、副虹は太陽高度が51度の時に対日点51度が発生する。（図5、6）

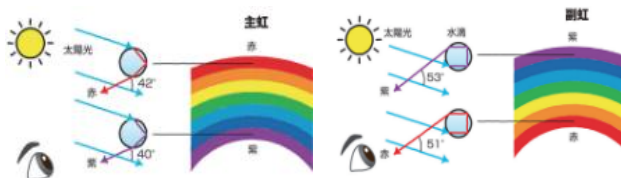


図5 主虹・副虹の反射
大空にかかるスペクトル・虹ができる仕組みより引用

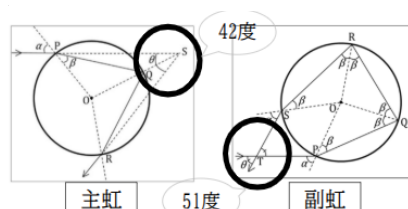


図6 主虹・副虹の反射
虹ビーズを用いた三次の虹の再現実験より引用

2.3 光の反射について

光は反射を繰り返すたびに拡散し、強度が減衰する（図7）。

このため、視認可能な虹は副虹までに限られるとされている。副虹は主虹に比べて反射回数が多く、より多くの光が失われることから、一般に主虹よりも暗く観測される。この現象を再現する際には、反射面に反射物を設置する必要がある。

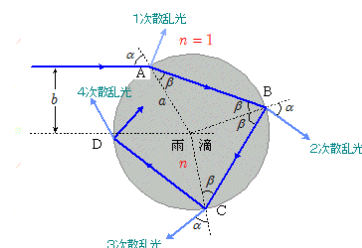


図7 反射による光の拡散
中川のビジュアル物理教室
虹散乱での反射率と偏光より引用

2.4 虹色現象・環水平アークについて

虹色現象とは、主虹や副虹のように半円状に現れるもの以外で、水滴や氷による光の屈折・反射により虹色を帯びる現象の総称である。

本研究の1.1節において観察された水平に延びる虹色の現象（図1）は、虹色現象の一種である環水平アークであることがわかった。環水平アークは、上層雲（巻層雲・巻積雲・巻雲）に含まれる六角柱状の透明な氷に太陽光が屈折することにより発生する（図8）。

この現象が発生するためには、太陽高度が58度以上である必要がある。

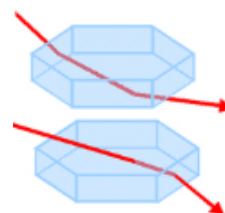


図8 環水平アークの屈折
光学現象データベースより引用

2.5 凝固点降下

純粋な水や他の溶媒に、不純物（溶質）が溶け込むと、その溶液の凍る温度（凝固点）が純溶媒の凝固点より低くなる現象のことを「凝固点降下」という。（図9）

この現象の凝固点の差を利用して環水平アークを再現するために透明な氷を作る際に参考になり得ると考えられる。

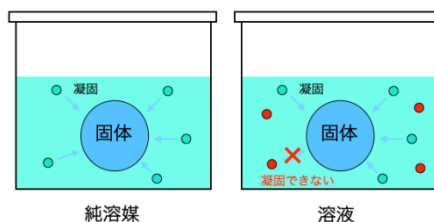


図9 凝固点降下の図解
凝固点降下—okkeより引用

3. 実験

3.1 反射物の比較実験

・実験理由

本研究の2.3節に示した光の拡散を防ぐために、虹の再現の時に使用できる反射物を探す。

・準備物（図10）

黒画用紙×2、照度計、アルミホイル、セロハンテープ、ライト、スチール板、ガラス板、黒画用紙を裏に貼ったガラス板、アルミホイルを裏に貼ったガラス板、スチールを裏に貼ったガラス板



図10 準備物

3.1.1 使用するライトの光の強さの測定

・実験方法（図11）

1. 黒画用紙の端から18cmの位置に白い線を引き、測定点を設定する。
2. ライトを黒画用紙の端ぎりぎりまで照射する。
3. 測定点と同じ高さで照度計を設置し、光の強さを測定する。
4. 上記の操作を同条件で5分おきに3回繰り返し、測定値の平均を算出する。（値は小数第2位で四捨五入）

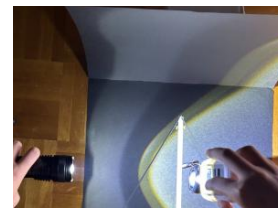


図11 実験の様子

3.1.2 反射物ごとの反射率の測定

・実験方法（図12）

1. 黒画用紙の中央から18cmの位置に垂直方向の直線を引き、そこから入射角と反射角をそれぞれ45°設定し線を引いた。入射角と反射角が交わる点から18cmの位置に線を引き、測定点とする。
2. ガラス板を後方で支え、反射光が背面に届かないようにして垂直に立てる。
3. 入射角および反射角に対応する18cmの位置にライトと照度計を設置し、光の強さを測定する。
4. 上記の操作を同条件で5分おきに3回繰り返し、測定値の平均および反射率を算出する。（値は小数第2位で四捨五入）

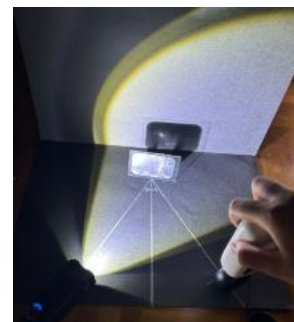


図12 実験の様子

3.1.3 反射物の比較実験の結果

- ・ガラス単独の場合の反射光強度は平均1014luxであった。

ガラス＋黒画用紙の場合、平均905.7luxで約3.9%と最も低くなった。

ガラス＋アルミホイルでは平均3408.3lux、約14.5%となり、反射光が大きく増加した。

ガラス＋スチールでは平均4188lux、約17.9%となり今回の条件下で最も強い反射光が得られた。

表1 約23500luxの光を当てた時の反射物別の反射率

	普通のライト (lux)	ガラス (lux)	ガラス ＋ 黒画用紙(lux)	ガラス ＋ アルミホイル(lux)	ガラス ＋ スチール(lux)
1回目	23600	1015	906.0	3427	4292
2回目	23200	1016	904.9	3407	4061
3回目	23500	1011	906.2	3391	4211
平均	23430	1014	905.7	3408.3	4188
反射光の 反射率		4.3%	3.9%	14.5%	17.9%

3.2 ビーカーを利用した主虹・副虹形成における反射角の実験的検証

- ・実験理由

文献調査によって得られた主虹および副虹の反射角が正確であるかを検証し、その結果を、水晶を用いた実験へ応用するため

- ・準備物（図13）

ライト、水で満たしたビーカー、スチール板、文献引用の反射図を写したクリアファイル

- ・実験方法（図14）

1. 水を入れた金魚鉢を実験台上に設置する。
2. 様々な方向からライトを照射し、虹が発生する条件を検証する。
3. 虹が観察された際の角度を測定する。



図13 準備物



図14 実験の様子

3.2.1 主虹の反射角検証における結果

- ・文献調査の通り42度の位置に、ライトを当てると七色に分光された主虹ができた（図15）



図15 主虹の再現（左から再現時の光の反射角・再現時の様子・再現された虹）

3.2.2 副虹の反射角検証における結果

- ・文献調査の通り51度の位置に、ライトを当てると七色に分光され、副虹と思われるものができたが文献通りに色の反転は起きなかった。(図16, 17)



図16 副虹の再現(左が主虹・右が副虹)



図17 副虹再現時の光の反射角

3.3 水晶を用いた主虹および副虹の再現実験

- ・実験理由

本研究3.2で行った実験を応用して、水滴を模した水晶を用いて主虹および副虹を再現するため

- ・準備物 (図18)

ライト, 水晶, 水晶を固定するもの, スチール板, 文献引用の反射図を写したクリアファイル

- ・実験方法 (図19)

1. 水晶玉を安定した位置に固定する。
2. 水晶玉の中心付近に向けてライトを照射する。
3. ライトの位置を徐々に移動させ、虹が発生する瞬間を観察する。



図18 準備物

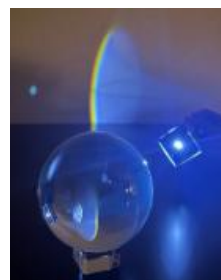


図19 実験の様子

3.3.1 水晶による主虹の再現実験の結果

本研究3.2.1の条件に従い、虹の反射角が42度となる位置に水晶へライトを照射したところ、半円状の主虹が観察された。(図20, 21)



図20 主虹の再現時の様子



図21 主虹再現時の光の様子

3.3.2 水晶による副虹の再現実験の結果

本研究3.2.2の条件に従い、虹の反射角が51度となる位置に水晶へライトを照射したところ、半円状の副虹が観察され、文献通り七色の反転が観察された (図22, 23)。



図22 再現時の様子

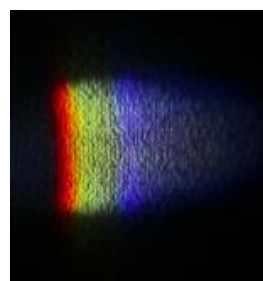
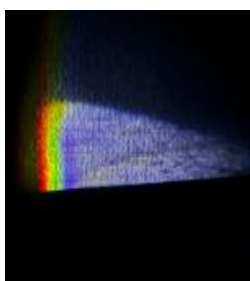


図23 図22を拡大したもの(左が主虹・右が副虹)

3.4 環水平アーク再現のための透明氷生成に関する実験

・実験理由

環水平アークを再現するためには透明な六角形状の氷が必要なため透明な六角形状を作製するため。

3.4.1 沸騰による透明氷の生成

・準備物 (図24)

六角形の型、発泡スチロールの箱、タオル、水道水、精製水、鍋、冷却用容器 (コップ)、ラップ



図24 準備物

・実験方法

1. 水道水・精製水・10分間沸騰させて冷ました精製水を準備する
2. それらを空気が入らないように型に流し込む (※₃)

※₃沸騰させた水を冷ますときは空気が入らないようラップをする (図25)

3. 発泡スチロールの箱 (タオル入り) に入れたものとそのまま凍らせたものを作る



図25 ※₃の様子ラップを水面に密着させている

3.4.1.1 沸騰による透明氷の生成の結果

・水道水では不純物や気泡の影響で氷内部に白濁が多く、透明度は低かった。

・精製水 (沸騰なし) でも気泡や白濁が観察され、完全な透明氷にはならなかった。

・精製水 (沸騰10分) では白濁が減少し、比較的透明度の高い氷が得られたが完全な透明氷にはならなかった。

・どの条件でも発泡スチロール容器を用いた場合、断熱効果により凍結速度が抑えられ、気泡の排出が進んだことで透明度がさらに改善した。

表2 沸騰処理によって作製した透明氷の比較

	水道水	精製水 (沸騰なし)	精製水 (沸騰10分)
発泡 スチロールの 箱無し			
発泡 スチロールの 箱有り			

3.4.2 凝固点降下を利用した透明氷の生成

・準備物（図26）

穴をあけた六角形の型，六角形の型を設置する外容器，
発泡スチロールの箱，タオル，
水道水，精製水，鍋，冷却用容器（コップ），ラップ
・実験準備



図26 準備物

1. 本研究3.4.1で最も透明性が得られた条件である「精製水を10分間沸騰させたもの」を準備する。
2. 4つの穴を開けたシリコン容器を用意し、それを収められる深さがあり、シリコン容器を浮かせることができる外容器に設置する。
3. 外容器全体を、1で準備した沸騰処理を施した精製水で満たした。
4. 本研究3.4.1と同様の手順に従い、3のものを凍結させた。

3.4.2.1 凝固点降下を利用した透明氷の生成の結果

凝固点降下を利用して作製した氷では、内部に生じる気泡や白濁が減少し、通常の凍結条件で得られる氷と比較して高い透明度が確認された（図27）。ただし、完全な無色透明にならず、一部に放射状の白濁や亀裂状の構造が残ってしまった。



図27 凝固点降下を利用して生成された透明氷

3.5 生成した透明氷を用いた環水平アークの再現実験

・実験理由

本研究3.4で生成した透明氷を使って、研究動機にもなっている半円の形ではない虹色現象の環水平アークを再現するため。

・準備物（図28）

氷固定用具（自作），ライト，分度器，
3.4.1で最も透明だった精製水を10分間沸騰させて
発砲スチロールの箱に入れた氷，
3.4.2で凝固点降下を利用して作った氷

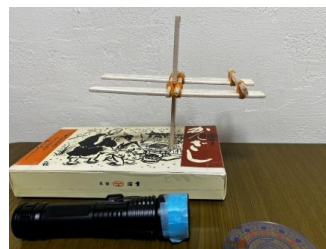


図28 準備物

・実験方法（図29）

1. それぞれの氷を氷固定具で固定する
2. 本研究2.4の文献通りに58度を分度器で測りそれ以上の角度で氷の側面からライトを当てる
3. ライトの位置を徐々に移動させ、虹が発生する瞬間を観察する



図29 実験の様子

3.5.1 生成した透明氷を用いた環水平アークの再現実験の結果

- ・本研究3.4.1で最も透明だった精製水を10分間沸騰させて発砲スチロールの箱に入れた氷
→平行な形になっている七色の虹が観察された（図30）



図30 精製水を10分間沸騰させて発砲スチロールの箱に入れた氷によってできた虹色現象

- ・本研究3.4.2で凝固点降下を利用して作った氷
→平行だと思われる七色の虹の一部分が観察された（図31）

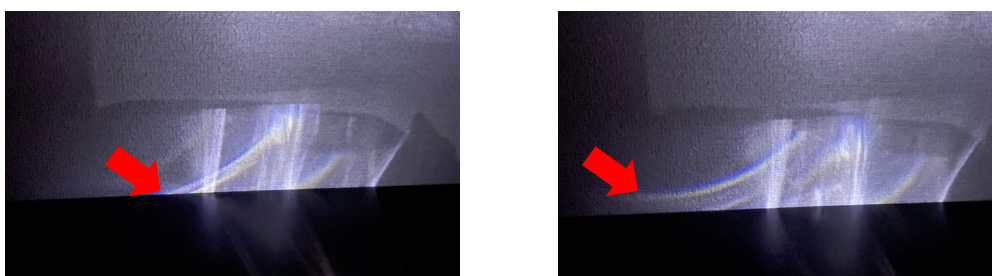


図31 凝固点降下を利用して作った氷によってできた虹色現象

4. 考察

4.1 反射物の比較実験について

反射物の比較実験により、ガラス単体や黒画用紙との組み合わせでは反射光が弱いのに対し、検証した中ではスチールを用いた場合に最も強い反射光が得られることが分かった。黒画用紙を反射物としたにもかかわらず反射率がとても低かったのは、黒画用紙が光を吸収してしまったのだと考えられる。また、最も反射率が高かったスチールでも約18%しか反射光が得られなかったことから、より反射率の高い反射物を見つけることによってより鮮明な虹を作成することができるのではないかと考えられる。

4.2 ビーカーを利用した主虹・副虹形成における反射角の実験的検証について

ビーカーを用いた検証では、主虹の反射角の約42度と副虹の反射角の約51度を確認することができ、文献で示された角度の妥当性を実証できた。ただし、副虹については色の反転が確認されず主虹と思われる虹の外側に副虹と思われる虹が再現されることも確認されなかった点が課題として残った。

これは副虹ではなかった可能性があるが、3.3での結果では反転し、主虹の外側にある虹が51度の時に確認されているので、副虹の反射角が51度であることは正しいと考えられる。

4.3 水晶を用いた主虹および副虹の再現実験について

水晶を用いた再現実験では、文献通り主虹および副虹の形成が確認され、さらに副虹における色の反転及び主虹の外側に形成されることも確認できた。このことから、水晶を水滴のモデルとして用いることによって高次の虹を再現することは可能だと考えられる。

4.4 環水平アーチ再現のための透明氷生成に関する実験

環水平アーチの再現に向けて行った透明氷生成実験みでは、沸騰処理や凝固点降下を利用することで氷の透明度を向上させることができた。ただし、完全に無色透明な氷を得ることは難しく、一部に白濁や亀裂が残った。このことより、凝固点降下の際に使用した外容器の深さをより深くすることによって、不純物がより排出され、より透明な氷を作ることなどは可能かもしれないが完全に透明な氷を作るのは難しいのではないかと考えられる。

4.5 生成した透明氷を用いた環水平アーチの再現実験について

4.4の通り、完全に透明な氷を再現することができなかったのもことによって再現された虹色現象の環水平アーチは部分的かつ不完全であり、環水平アーチと断定できるものではなかった。これは氷のひび割れによる乱反射や不純物の影響が大きいと考えられる。このことより環水平アーチをはじめとする氷による虹色現象を再現するにはより透明度の高い氷を再現するのが必要であると考えられる。

5. 結論

本研究では、高次の虹および虹色現象の人工的な再現を目的として、反射物の比較実験、ビーカーや水晶を用いた虹の再現実験、さらに環水平アーチ再現のための透明氷生成実験、生成した透明氷を用いた環水平アーチの再現実験を行った。反射物の比較実験ではスチールを用いた場合に最も強い反射光が得られ、反射物の選択が虹の鮮明さに大きく関わることが分かった。ただし、反射率は18%程度にとどまり、さらなる高反射率の素材を探す必要があることを理解した。

主虹・副虹の反射角のビーカーを用いた実験では、文献通り主虹は約42°、副虹は約51°で再現され、反射角の妥当性が確認できた。ただし文献通りに副虹の色反転及びは確認されず、再現精度に課題が残った。

水晶を水滴モデルとして用いて主虹・副虹の再現を行った実験では、主虹および副虹の形成、さらに副虹における色の反転及び主虹の外側に副虹が再現されることも観察できた。これにより、水晶を水滴のモデルとして用いることによって高次の虹を再現することは可能だと考えられた。

透明氷の生成と環水平アーチの再現では沸騰処理や凝固点降下を利用することで氷の透明度を高めることはできたが、完全な透明氷を得ることは難しく、一部に白濁や亀裂が残った。そのため、再現された虹色現象は部分的かつ不完全であり、環水平アーチと断定できるものではなかった。

以上のことより、反射物の比較においては、スチールを上回る反射率を有する素材を探索する必要がある。

また、ビーカーを用いた主虹・副虹の反射角の検証において、副虹の反射角に関する実

証をより追究することが求められる。さらに、反射物や反射角の条件を精密に測定することで、副虹以上の高次の虹を水晶によって再現できる可能性がある。加えて、虹色現象の再現に向けては、より高い透明度を有する氷の生成方法を追究し、断定可能な虹色現象を再現できるようにすることが今後の課題である。

6. 参考文献

西条敏美（2015 - 2月）「授業 虹の科学光の原理から人口虹の作り方まで」 太郎次郎社エディタス

柴田清孝（1999 - 11月）「光の気象学」朝倉書店

人工虹ビーズ版の効果的な製作方法の考案と 演示実験の実践

https://www.jstage.jst.go.jp/article/pesj/67/4/67_248/_pdf（2023.5.30閲覧）

國介寛人、小林悠介「虹ビーズを用いた三次の虹の再現実験」

https://mieu.repo.nii.ac.jp/?action=repository_action_common_download&item_id=13145&item_no=1&attribute_id=17&file_no=1（2023.5.30閲覧）

光学現象データベース

http://www.ha.shotoku.ac.jp/~kawa/KYO/KISYOH/kougaku_db/kaisetu/index.html（2023.5.30閲覧）

静岡大学 「環天頂アーク・環水平アーク中学生までの知識でアークの発生原理を理解する」

<https://wwp.shizuoka.ac.jp/arc/>（2023.5.30閲覧）

大空にかかるスペクトル

<https://opticaltale.blogspot.com/2020/07/blog-post.htm>（2023.5.30閲覧）

レア度で解説！めったに見られない虹色現象とは？

<https://weathernews.jp/s/topics/201711/140095/>（2023.5.30閲覧）

FNの高校物理 「虹の理論」

<https://fnorio.com/0036rainbow1/rainbow1.htm#1>（2023.5.30閲覧）

透明な氷の作り方

https://weathernews.jp/s/topics/202007/230095/#google_vignette
（2025.7.30閲覧）

氷と気泡 透明な氷を作ろう！ NGKサイエンスサイト

<https://site.ngk.co.jp/lab/no48/>（2025.7.30閲覧）

凝固点降下- okke

<https://okke.app/words/p/8zzu9RA9jRFTU>（2025.7.30閲覧）

7. 謝辞

本研究を遂行するにあたり、終始ご指導を賜りました先生方に深く感謝申し上げます。

さらに、日頃から温かく励まし支えてくださった家族・友人にも、この場を借りて感謝いたします。

加えて、本研究に関心を寄せ、貴重な助言や示唆を与えてくださった多くの方々にも御礼申し上げます。

ここに記して、皆様への謝意を示します。