

〈第 68 回静岡県学生科学賞 県教育長賞〉

# 橋を下からのぞいてみたら ～アーチと三角形の比較～

浜松市立曳馬中学校

1 年 塩崎文乃

## 1 研究目的

私の住む浜松市には、遠州鉄道（通称：赤電）が走っている（図 1）。学校までの通学路に沿って走っている赤電は高い橋の上を通っており、その橋を下からのぞくと、橋によってけたの数や太さが違うことに気づいた。そこから自由研究で橋の構造と強さの関係を調べている。最終的な目標は、自分が乗れるような橋を作ることだ。

小学 4 年生の自由研究でけた橋の強さを調べてみた結果、橋の太さや橋げたの数を調整することで、橋の強さが変わることが分かった。工作用紙で作ったけた橋では約 3kg の重さを支えられた。



図 1. 遠州鉄道とけた



図 2. アーチ橋

その後も、赤電を観察していたところ、曳馬駅の北側の橋だけ橋の形が違っていることに気づいた（図 2）。形はゆるやかなアーチ型になっていて、橋脚の間隔が長くなっている。山口県岩国市に古くからある錦帯橋などの橋もアーチ型になっているため、アーチ型の橋は普通のけた橋よりも強いのではないかと考えてアーチ型の橋の実験を行っている。

今までの実験を通じて、アーチ型の橋はけた橋よりも強いことは確認できているが、目標としている自分が乗れるような強い橋はできていない。そのため、より強い橋を目指して今回の実験に取り組んだ。実験に取り組む中で、使う紙の量が増えてきたが、使う紙の量が増えるということは材料費用が掛かるということである。実際の橋を建設することを考えると橋の材料は少ない方が効率的である。そのため、橋の重さと強さの関係にも着目して比較を行うことにした。

## 2 研究方法

### (1) アーチ橋の作り方

橋は図 3 のように工作用紙を使って作った天板（幅 6cm）、側面（2 枚）、底面の 4 つの部分からできており、それぞれの部分をのりで接着させる。工作用紙に各部分の線を書き込み、その線に合わせてカッターで切る。アーチ型の曲線はコンパスを使って円弧を書き、それに合わせてカッターで切る。ただし、アーチ型の高さが

低くなると、円が大きくなりコンパスでは書くことができなくなってしまったため、パソコンで印刷した曲線に合わせて切った。底面は側面のアーチ型に合わせて接着させるため、切込みを入れておく。

側面の一番細い部分は2cmに決めておき、アーチの高さを変えた橋を作って比較することで、一番強いアーチ型を探す。橋の長さは30cm、橋脚間は20cmにするため、アーチ型の幅は20cmとして、その横に2cmの平らな部分を作る。この平らな部分が橋脚にあたる部分である。

橋の中央部分には2cm幅で×字型の補強(図4(i))を入れる。この補強がない場合、アーチ橋に上から力を掛けると橋の中央部分の四角が斜めにつぶれてしまう。手で押さえても簡単に左右にぶれてしまう事から、もう少し強い橋を作りたいと思いこの補強を考えた。四角の形に合わせて紙を入れるだけでも強くなると考えたが、固定のことを考えて斜めに折り曲げて×字型の補強とした。

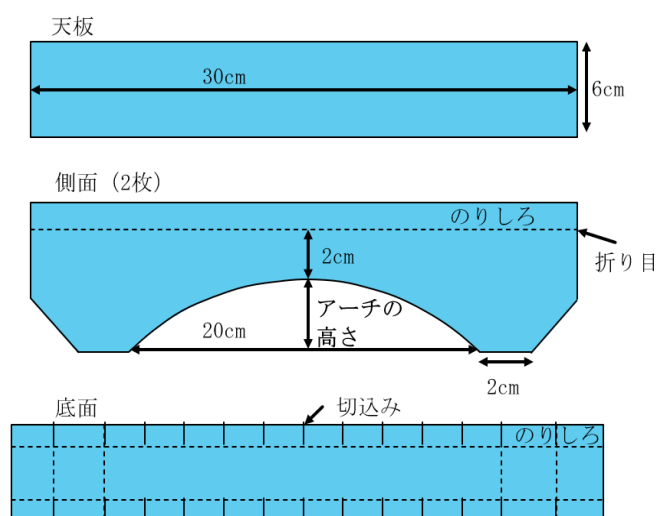


図3. 橋の設計図

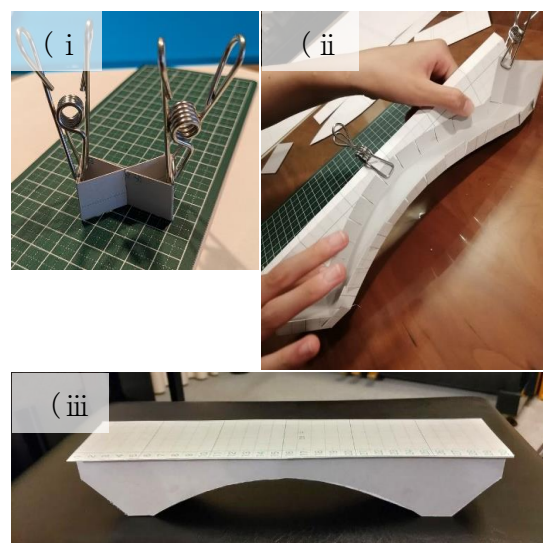


図4. (i) 補強 (ii) 組立中 (iii)

## (2) 実験の方法

上記の手順で作った橋と体重計を使ってその強度を測定する。体重計に橋を乗せて橋の上から手のひらで橋の中央部分に体重をかける。橋に力を加えると体重計に表示される数値が増えていくが、橋が壊れたところで力がかかなくなり体重計の数値が急に減る(図5のグラフ)。体重計に表示された数値で最大の数値を橋の強さとした。

それぞれの橋はキッチンスケール(図6)で重さを測って実験後に橋の強さとの関係を確認した。

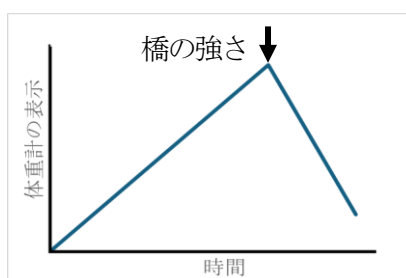


図5. 体重計での測定の様子



図6. キッチンスケール

### 3 実験① アーチ橋と四角の数

#### (1) 方法

過去に行ったけた橋の実験より、けたの本数が多い方が強くなることが分かっている。また、アーチ橋の実験ではアーチの高さ 2cm が一番強い結果であった。この 2 つを組み合わせ、アーチ橋と四角で橋を作り四角の数で強さの変化を確認した。

#### (2) 結果

四角（けた）の数が増えると橋が強くなった。四角の数が 1 つの場合は 8.8kg の強さであったが、四角の数が 4 つの場合は 15.3kg であり、1 つの場合の約 1.7 倍になった。

四角の数が増えるということは、たくさん紙を使えば強くなるという当然の結果ともいえる。橋が壊れた箇所は、全て橋の中央部分に入れた補強の横であった。

#### (3) 考察

四角の数が多くなることで強くなる結果であった。しかし、四角の数が増えるということは、側面の紙の枚数が多くなることであり、構造が複雑になってしまう。もう少し単純に紙を重ねるだけでも強くなるのではないかと考えて次の実験を行った。

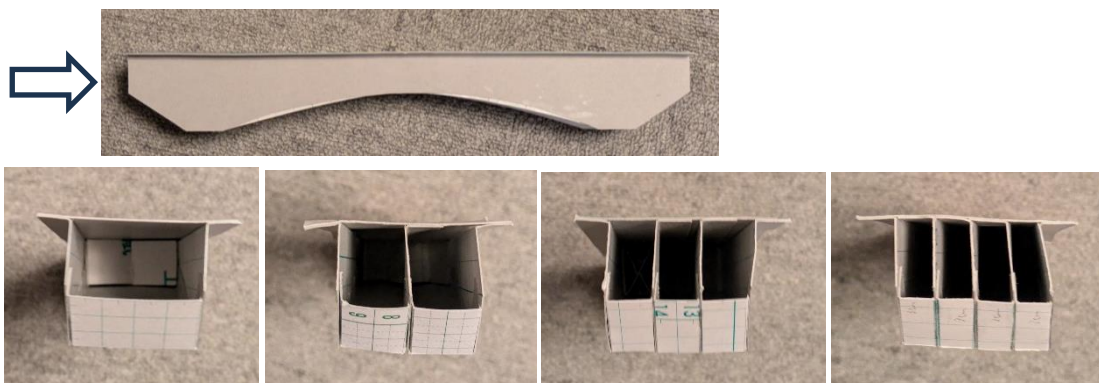


図 7. 実験①で作ったアーチ橋（橋の全体写真矢印方向から撮った写真）

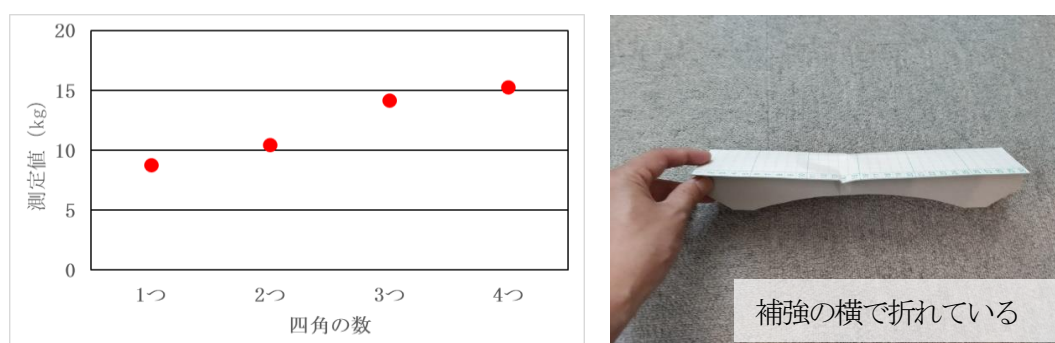


図 8. 実験①結果

### 4 実験② 紙を重ねる（アーチ橋）

#### (1) 方法

アーチ橋の天板、側面、底面の紙を 2 重、3 重、4 重に重ねてのり付けして作り、その強度を比較した。

#### (2) 結果

紙を重ねると橋が強くなった。紙を4重にした場合、17.0kgの強さであり、単純なアーチ橋の約1.9倍になった。四角の数を増やした時よりも橋が重くなっていた。四角を並べたアーチ橋では紙自体は1枚であったが、今回の紙を重ねたアーチ橋は全体に2重3重となることで橋自体の重さが重くなり、より頑丈になったのだと考えられる。ただし、同じ重さで比べると、四角の数が多い方が強い。

橋が壊れた箇所は、実験①と同じで補強の横であった。

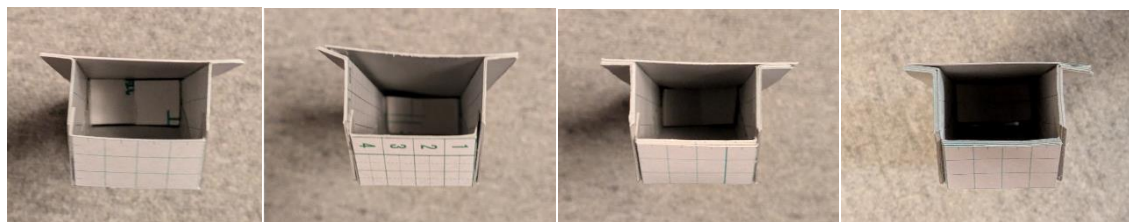


図9. 実験②で作ったアーチ橋 左から紙の枚数を1枚、2枚、3枚、4枚とした

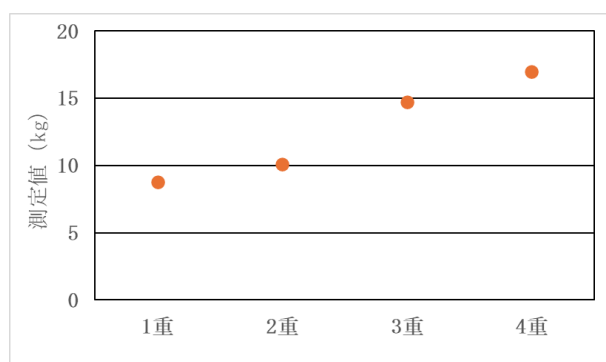


図10. 実験②結果

### (3) 考察

ここまでの実験で、使う紙の量を増やすことで橋が重く頑丈になったが、相変わらず橋の中央部分で壊れてしまう。さらに強い橋を目指すため、橋の中央部分を強くするにはどうしたら良いか考え次の実験を行った。

## 5 実験③ 補強を増やす (アーチ橋)

### (1) 方法

これまでの実験では、補強の横で橋が折れてしまっていた。そこで、中央部分に入れている補強を2つつなげて補強がある部分を広くすれば壊れにくくなると考え、補強を増やしたアーチ橋を作りその強度を測定した。

### (2) 結果

補強を2つにしても強さはほとんど変わらなかった。

橋が壊れた箇所は、補強の横であることは変わらなかった。



図 1 1. 実験③結果

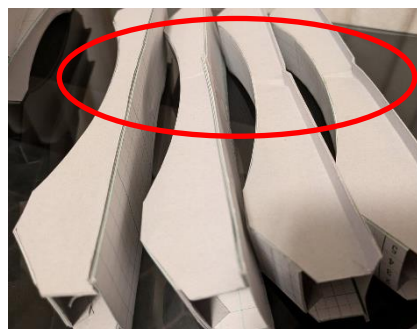


図 1 2. アーチ橋の壊れた箇所

### (3) 考察

この実験から補強の数（幅）は橋の強さにほとんど関係ないと考えられる。

補強の横で壊れてしまう原因を考えた。アーチ橋に上から力を掛けると橋の中央部分はほとんど平らで細くなっている。この細い部分を強くするのが橋を強くするポイントと推測した（図 1 2）。

## 6 実験④ 三角形の橋

### (1) 方法

これまでの実験から、橋は強くなっても壊れるのは補強の横だった。そして補強の数（幅）を変えても強くならなかった。橋の本を読んでいると三角形を組み合わせることができるトラス橋が出てくるため、三角形を使って強くできないか考えた。これまでは断面が四角形だったが、三角形を組み合わせさせて断面にした橋を作ってみた（図 1 3）。（三角形の橋をアーチ型にするのは難しいため底面が平らな橋を作って実験した。）

三角形の橋を測定するときは、体重計の上に積み木を積んで高さを高くし、その上に橋を置いた。積み木の間はアーチの橋脚の間と同じ 20cm で実験した。

実験②と同じように紙を重ねた場合も比較した。



図 1 3. 三角形の橋

### (2) 結果

三角形の橋（紙 1 枚）では 17.2kg の強さとなり、アーチ橋の約 2 倍の強さとなった。

4 重に紙を重ねた橋では 36.4kg の強さとなり、アーチ橋の約 4.1 倍とかなり強くなった。

橋の壊れ方を見ると、天板がへこみ、底面がやぶれていた。

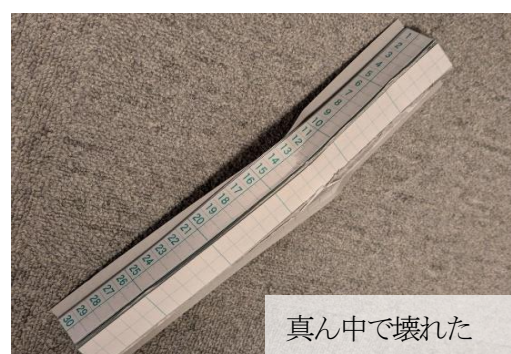
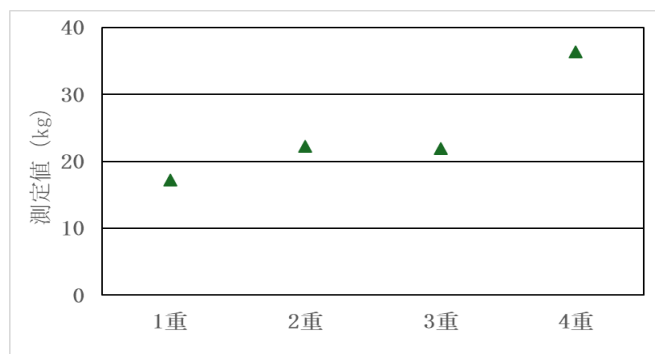


図 1 4. 実験④結果

### (3) 考察

三角形の橋（紙1枚）はアーチ橋と比べて2倍の強さとなったが橋の重さは約1.5倍のため、効率よく強くできたと言える。三角形の橋は補強がないが、それでもかなり強くなった。

紙を2重にした実験では、1枚の時と変わらなかったため作り方に問題があったのではないかと考えてもう一度作ってみた。その結果2回目の方が強くなった。重さを比較したところ1回目の橋の方が軽いため、のりの量で多少の誤差があると考えられる。

## 7 実験⑤ アーチと三角形の橋

### (1) 方法

これまでの実験から、三角形の橋は強くなったがこの状態でもアーチ型の効果があるのか確認するため、アーチ型と組み合わせて橋を作って実験した。しかし、単純に組み合わせただけではアーチの部分がぐらぐらしてしまうため、三角形を追加した。

紙1重で実験をしたところ、橋脚のところの紙がつぶれてしまったため、側面の紙を2重にした場合も確認した。

### (2) 結果

アーチと三角形の橋では15.9kgの強さとなり、アーチ橋の約1.8倍の強さとなった。紙が1重の場合は、アーチの橋脚の部分でつぶれていた。

側面のアーチ型の紙を2重にした橋では、30.8kgの強さとなり、アーチ橋の約3.5倍の強さとなった。この場合も橋脚のところで壊れてしまった。

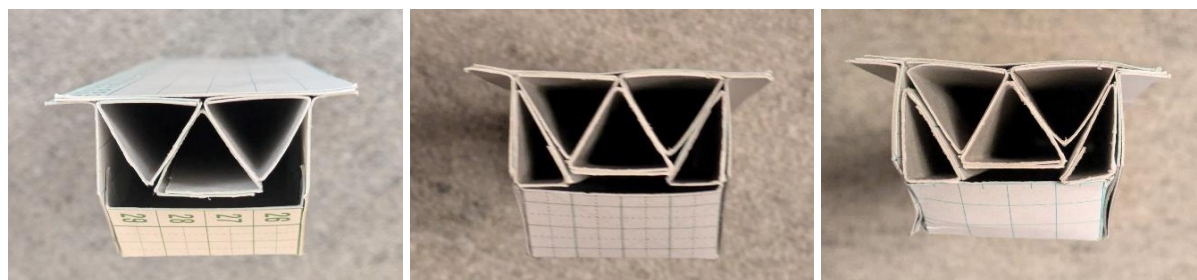


図15. 実験⑤の橋 左の状態ではグラグラしたためすき間に三角形を追加した（中央）  
右は側面の紙を2重にしたもの

### (3) 考察

この実験から、橋脚のところで壊れて橋の真ん中では壊れていないため、アーチの橋脚部分のみの強さが分かったと言える。紙1枚では15.9kg、2枚では30.8kgの強さに耐えられることが分かった。つまり、橋脚の紙を2重にすることで約2倍の強さになった。よって、紙の強さは厚さに比例すると考えられる。



図16. 実験⑤結果

## 8 全体を通しての考察

### (1) 橋を強くする

橋の真ん中の下側には引張力が、上側には圧縮力が働くため、一番弱い真ん中で折れてしまう。（図17）その力に耐えるように、紙を厚くする、三角形の構造を取り入れる、ことが必要で、それにより引張力、圧縮力に強くなる。

## (2) 橋脚を強くする

橋脚に上から力がかかるため、その反力として働く下からの力に耐えられるように紙を厚くすることが必要である。(図18)

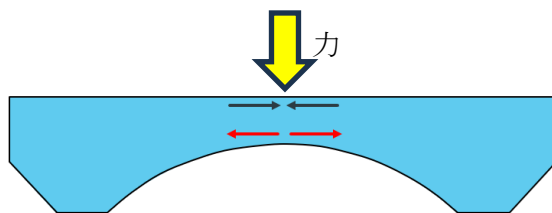


図17. 圧縮力（黒）と引張力（赤）

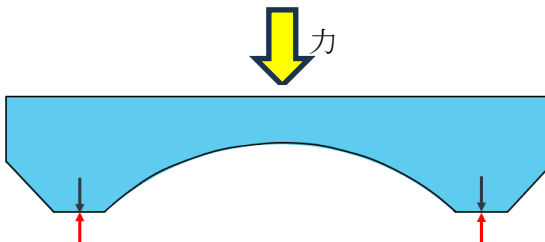


図18. 上からかかる力（黒）と反力

## (3) 強度比較

紙を多く使えば橋は強くなるが、材料費がかかってしまう。効率の良い橋を考えるために測定値を橋の重さで割って、橋の重さに対する強さを比較した。その結果、最大値は三角形の橋だった。よって、三角形の橋が最も効率よく強い橋であると考えられる。

実験結果より測定値と橋の重さは比例している。つまり紙をたくさん使うと橋は強くなった。実際の橋も強いほどたくさん材料費用が掛かっているのだろうと思った。しかし、同じくらいの重さの橋でも強さが少し違うこともあるので、出来るだけ少ないコストで強い橋を作ることが大切かと思った。そして、今回作った橋で効率が良かったのは三角形の橋やアーチと三角形を組み合わせた橋だと思う。つまり、三角形が多く使われるのはコスパがいいからだと考えられる。

ただし、三角形の構造を取り入れても一部でも弱いところがあるとそこで壊れてしまうことがあるので、橋に要求される強度に応じて全体のバランスをとることも重要だと感じた。

三角形の構造が強い理由を考えてみた。四角形では上から力がかかって変形してしまう。それに対して三角形では圧縮力、引張力が各辺にかかり打ち消し合うため強くなるのだと考えられる(図20)。

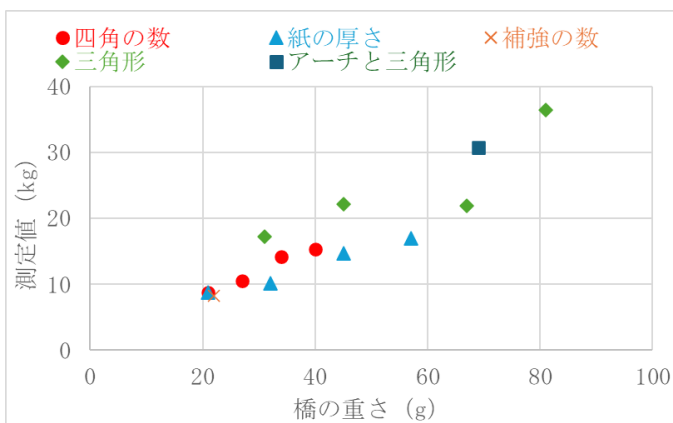


図19. 実験結果一覧

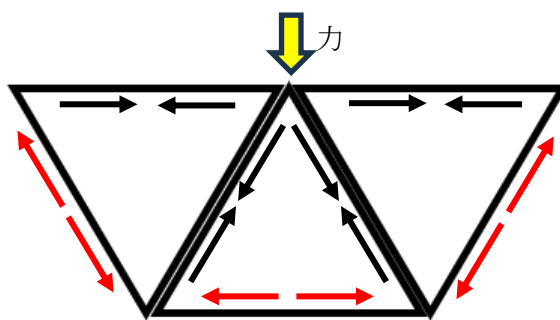


図20. 三角形は力を加えても角度が変わらず形が崩れない  
圧縮力（黒）、引張力（赤）

## 9 結論

小学4年生の時に実験したけた橋と、6年生の時に実験したアーチ橋を組み合わせることで、より強い橋を作ることができるか実験した。その結果、紙を厚くすること、四角形、三角形の構造を取り入れることでより強い橋ができ、その中でも三角形の構造が一番強いことが分かった。一番強い橋では 36.4kg の重さに耐えられた。

三角形の構造では引張力、圧縮力が打ち消し合うため強くなると考えた。

## 10 感想

通学中、赤電の橋を見あげながら、どうすればより丈夫な橋になるのかを考えた。太い橋脚はコンクリートに覆われているが、その中はどうなっているのかと想像した。コンクリートの厚みはどのくらいだろうか。橋桁の中はどうなっているのだろう。その部分を想像し、今回は紙のパーツを重ね、三角形の構造を追加することにした。紙を重ねるため同じパーツを何枚も用意しそれを重ねてのり付けしたが、厚みがあるためきれいに接着されるには、完全に乾くまでのり付けの都度、長い時間押さえておく必要があった。製作した橋は、紙とは思えないほどずっしり重く、期待できるものだった。

実験では、丈夫な橋になったため苦労もあった。橋の強度を測定するのに、自分で橋に力を加えていくが、どんなに力を加えてもなかなか壊れなかったからだ。これまでの実験では、時間をかけて製作した橋も、壊れるのは一瞬だったが、今回は耐久性があり、全体重をかけても壊れないのではないかと期待がもてた。その反面、私の力では橋に少しずつ力を加え続けることが困難となり、壊れる前に休憩が必要な程だった。今後、更に強度の高い橋ができた際には、強度測定の方法にも工夫が必要だと感じた。

今回は、製作段階でも橋は明らかに丈夫に見えたため、実験結果が楽しみだった。実際に、アーチ橋の紙の厚みを4重にしたことで17 kgまで耐えられるものになり、三角形で製作した橋（4重）では、アーチ橋（4重）の更に2倍以上の36.4 kgも耐えられるようになった。

昨年の実験では8.8 kgまで耐える橋ができ、それ以前の約3倍の強度になったことで驚いたが、今年の実験では更にその4倍以上の強度になった。目標の「私が乗れる橋」を作るという結果に、あと一步のところまで近づくことができた。今後は、補強のすぐ横で折れるという問題点を解決したいと思う。また今回、つり橋の製作も試みたが良い製作方法と実験方法が思いつかなかったので、次回はつり橋の製作にも挑戦していきたい。

## 11 参考文献

監修 五十畑弘 「調べる学習資料 あんな形 こんな役割 橋の大解剖」 岩崎書店

日本橋梁建設協会 技術資料 <https://www.jasbc.or.jp/routepress21st/rp21st-09-01.php>

## 12 お世話になった方

浜松 RAIN 房（浜松ダヴィンチキッズプロジェクト）