

紙の折り目と質量

Relations between folds and mass of paper

久保 慶将 喜久山 晴生 橋本 和孝 松下 慶一郎

Keishuke Kubo, Haruki Kikuyama, Kazutaka Hashimoto, Keiichiro Matsushita

1. 要旨, 概要

水に濡れてしわになった本を元に戻したいと思い、紙のしわについて研究を始めた。しわの量を数値化する方法を探っていたが、ほぼ不可能であった。そこで、紙のしわと、紙の折り目は似ているのではないかと考え、量を数値化しやすい折り目に注目して研究を始めた。実験をしていると、紙を折ると質量が減少することに気づき、大変興味を持った。紙の折り目と質量の関係について調べた先行研究はなかった。

そこで研究目的を、次の2つとした。

- ①紙を折った時に質量が変化することについて調べる。
- ②紙の折り目と質量の関係について調べる。

上記について、次の2つの仮説を立てた。

- ①紙を折ると手の熱が伝わり、紙に含まれていた水が蒸発するため、折った直後は質量が減少する。
- ②紙を折ることで繊維が変形し、紙が含める水の量が増えるため、最終的な質量は増加する。

実験ではまず、サーモグラフィで紙を折る時の様子を撮影した。その結果、手で紙を折ると紙の温度が上昇した後、元の温度より低くなった。これは蒸発熱の影響だと考えた。次に、乾かした紙が、空気中の水を吸収する際の質量変化の仕方を調べた。その結果、折った紙は折っていない紙とは異なる質量推移をすることが分かった。最後に、長時間放置した紙の質量を比較する実験を行った。その結果、折った紙と折っていない紙で質量に有意な差は見られなかった。

以上より、結論は以下の通りである。

- ①紙を折った直後は、手の熱が伝わることで水が蒸発し質量が減少する。
- ②折った紙も折っていない紙も最終的な質量は同じだが、その質量にたどり着くまでの質量の変化の仕方が違う。

この研究において、環境の影響を受けて変化するものを正確に測定することが非常に難しかった。試行錯誤の中で、変化の仕方に注目することを思いつき、差を見出すことができた。折った紙と折っていない紙で、紙の質量推移に差があるという発見は、発展させれば当初の研究課題であった、紙のしわの測定に活かせる可能性がある。調べた限り、しわの量の測定方法は現在、画像処理技術を用いたものしかなかったため、ドライヤーと精密はかりを用いてしわの量を測定できるようになれば画期的である。

2. 問題提起, 研究目的

水に濡れてしわになった本を元に戻したいと思い研究を始めた。実験により、紙を構成する繊維が不均一であるため、乾く時には必ずどこかでしわになることが分かった。更に研究を進めるため、しわの量を数値化したいと思ったが、それはほぼ不可能であった。そこで、紙のしわと、紙の折り目は似ているのではないかと考え、量を数値化しやすい折り目に注目して研究を始めた。実験をしていると、紙を折ると質量が減少することに気づき、興味を持った。

紙の主成分はセルロース(図1)で、多くのヒドロキシ基は分子間で水素結合しているが、一部は空気中の水と結合する。結合している水分量は環境(温度、湿度)により変化し、結合している水分量が変化すると紙の質量も変化することが分かっている。湿度と紙の水分量との関係については、ヒステリシス現象などが知られているが、紙の折り目と質量との関係について調べた研究は見つからなかった。また、なぜ折り目が残るのかについては、吉田印刷所のWebサイトによると、「折ると繊維は変形し、つながりが壊れた後、一部の繊維は大気中の水分を吸収して再びつながり、歪んだままの状態では繊維どうしが結びつくことによって折り目が残る(図2)」とのことだった。

そこで研究目的を、次の2つとした。

- ①紙を折った時に質量が変化することについて調べる。
- ②紙の折り目と質量の関係について調べる。

また、上記について次の2つの仮説を立てた。

- ①紙を折ると、摩擦熱で水が蒸発し、折った直後は紙の質量が小さくなる。(図3)
- ②先行研究(図2)より、紙を折ることで繊維が変形し、元々含んでいた量より多くの水を吸収できるようになるため、最終的に紙の質量は増える。(折り目が多いほど質量は増える)(図4)

3. 研究方法

初めに、すべての実験で共通する条件等について紹介する。

- ※1 実験で使用した紙はすべて、柿紙店の「玉藻」という更紙(A4サイズ)である。この紙は高松第一高校で多く使用されており、予備実験において他の紙よりも吸湿性が高かったため、質量変化を見やすいと思い使用した。
- ※2 紙の折り方は2通りある。1つ目は擦りながら折る方法で、一般的な紙の折り方である。この方法では紙に摩擦熱が生じ、紙の繊維が削れるといった可能性がある。2つ目は押しつぶすように折る方法で、1つ目の問題を解消する折り方である。実験2以降はすべて2つ目の折り方で紙を折った。
- ※3 実験中、紙に触れる際は手の油や汚れなどが付着しないよう、ビニール手袋もしくはゴム手袋を使用した。

実験1 : 紙を折るときに伝わる熱について調べる。

〈目的〉

紙を折った時に質量が変化することについて調べる。

〈仮説〉

紙を折ると、摩擦熱で水が蒸発する。

〈準備物〉

紙4枚、サーモグラフィ(メーカー:CHINO, 型番:CPA-E40A, 精度:±2℃)、物理スタンド、ビニール手袋、温度湿度計(メーカー:ケニス株式会社, 型番:MHB-382SD, 精度:±0.8℃, ±4.0% 以降これを使用)

〈方法〉

- ① 紙を上から撮影できるように物理スタンドを用いてサーモグラフィを固定する。
- ② 温度湿度計を質量の測定場所のすぐそばに置く。
- ③ 紙を用意し、サーモグラフィで撮影しながら紙を折る。
紙は4枚のうち半分は擦るように、半分は押しつぶすように折る。
サーモグラフィは、画面の中心の温度が表示されるため、中心が紙の折り目と重なるようにする(図5)。

実験2 : 紙を折る回数と質量の関係について調べる。

〈目的〉

折ることにより、最終的な紙の質量が変化するか、その変化量は紙を折る回数と関係があるのか調べる。

〈仮説〉

先行研究より、紙は折ると大気中の水を吸収するとあったため、紙を折る回数が多いほど紙の質量は増加する。

〈準備物〉

紙(大きさA4の1/4)40枚、精密はかり(メーカー:島津製作所, 型番:ATX224, 直線性:±0.2mg, 再現性:±0.1mg, 最小表示:0.1mg 以降これを使用)、ゴム手袋、ピンセット、恒温槽2つ、密閉容器(恒温槽に入る大きさ)2つ、100mlビーカー2つ、温度湿度計2つ、K₂CO₃飽和水溶液(炭酸カリウム75g, 水62g)

〈方法〉

- ① 恒温槽を用意し、その中に密閉容器を入れ、その中に K_2CO_3 飽和水溶液を入れたビーカーと温度湿度計を入れる。温度は 18~20°C に、湿度は飽和塩法を用いて 45~49% に固定する。さらに、この装置の中の温度と湿度を安定させるために 1 日置いておく。
- ② 装置の中に紙を入れ、1 日保管する (図 6)。
- ③ 保管した紙の質量を量り、その時の装置の中と、はかり周辺の温度と湿度を記録する。
- ④ 測定した紙を繊維に対して垂直方向に 10 回折り、装置の中で 1 日保存する。先行研究で、繊維のつながりが壊れた後、周りの水分を吸収するとあったので、繊維に対して垂直方向に折ると、多くの繊維が壊れ、水分量の変化が大きくなると考えた。
- ⑤ ③④を繰り返し、10 回折り、20 回折り、30 回折りの時の質量と温度、湿度を測定する。
- ⑥ 30 回折りの質量を測定した紙を、装置の中で 11 日間保存する。
- ⑦ ⑥の質量と温度、湿度を測定する。

実験 3 : 折った紙と折っていない紙の質量の変化の仕方を比べる。

〈目的〉

実験 2 で、紙の質量が測定環境の影響を強く受けることが分かった。値同士を比較することが難しいため、折った紙と折っていない紙について質量の変化の仕方を調べることによって、折ることにより紙が含める水分量が増えるかを調べる。

〈仮説〉

折っていない紙同士で質量の変化の仕方のグラフを比べた場合、初めに紙が含んでいる水分量が違っていても、使用する紙と測定環境が同じならば、グラフを時間軸方向に平行移動させることで重なる。これは、紙が含む水分量が同じになった時点において、吸湿速度も同じになると考えたからである。折った紙と折っていない紙のグラフを比べた場合、仮説②より、上記と同じように平行移動させて重ねたら、折った紙のグラフは折っていない紙のグラフよりも上にずれる。

〈準備物〉

紙 (大きさ A4 の 1/4) 7 枚、精密はかり、ビニール手袋、物理スタンド、ドライヤー、温度湿度計、デジタルカメラ、ストップウォッチ

〈方法〉

- ① 精密はかりの隣に温度湿度計を置く。
- ② 物理スタンドを用いてドライヤーを下向きに設置する (図 7)。
- ③ ドライヤーで紙を乾かす。
- ④ 乾かした紙を精密はかりに置き、質量が変化の様子をデジタルカメラで 5 分間撮影する (図 8)。測定環境が変わっていないか確かめるため、紙の質量を量る前と後の、温度と湿度を記録する。

【折っていない紙同士を比べる場合】

同じ紙を用いて、乾かす時間を 20s, 40s, 60s, と変えて行う。

さらに、試行回数を増やすためにこれらを 3 枚の紙について行う。

【折った紙と折っていない紙を比べる場合】

同じ紙を用いて、乾かす時間を 30s で一定にして、折っていない紙と折った紙 (繊維に垂直な方向と平行な方向にできるだけ多く折る) とで行う。

さらに、試行回数を増やすためにこれらを3枚の紙について行う。

【測定時間を5分から30分に延長した場合】

測定時間を30分に延長して、上記と同じように（乾かす時間は30s一定）、折った紙と折っていない紙とで行う。

実験4：折ってから時間の経った紙は、折っていない紙より質量が大きいのかを調べる。

〈目的〉

実験2を踏まえて、紙の保管環境と測定環境を一定にした上で、折ることによって紙が含める水分量が変わるかどうかを調べる。

〈仮説〉

保管環境、測定環境が一定である場合、十分な時間が経過した折った紙の質量は、折る前の質量と比べて増加する。

〈準備物〉

紙（大きさA4の1/4）100枚、エアコン、精密はかり、ビニール手袋

〈方法〉

- ① 紙を5枚で1セットとし、計20セット用意する。
- ② 実験室のエアコンを26℃に設定し、実験台の上で①の紙を放置する。
- ③ 放置した紙20セットについて質量を測定し、その時の温度と湿度を記録する。
- ④ ③のうち半分の10セットは、繊維と垂直な方向と平行な方向にできるだけ多く折り、12時間放置する。
- ⑤ 質量を測定し、温度と湿度を記録する。

4. 結果

実験1：紙を折るときに伝わる熱について調べる。

折る前の紙の温度を0とした時の、紙を折った後の温度変化を図9に示す。図9左側は擦るように折った場合のグラフで、右側は押しつぶすように折った場合のグラフがある。全ての紙において、折り方に関係なくグラフは同じような形状になった。紙に触る指の温度は、36℃であった。紙を折った直後は温度が4～5℃上昇し、その後急激に下降、その約10秒後に、折る前の温度よりも低くなった。

実験2：紙を折る回数と質量の関係について調べる。

折る前、10回折り、20回折り、30回折り、放置した紙、の質量を箱ひげ図にしたものを図10に示す。折る回数と質量に関係は見られない。

実験3：折った紙と折っていない紙の質量の変化の仕方を比べる。

紙の質量推移を、横軸が時間（s）縦軸が質量（g）のグラフにした。グラフの概形はどれも同じであり、軸のスケールを揃えて平行移動させることで、グラフ同士が重なるかどうか検討した。

【折っていない紙同士を比べる場合】

- 1回目の紙ではグラフは横方向にのみ動かして図12のように重なった。
- 2回目の紙では、縦方向にのみ動かして図13のように重なった。
- 3回目の紙では縦横どちらにも動かして図14のように重なった。

折っていない紙において、使用する紙、測定環境が同じ場合、乾かす時間が異なっても、質量推移のグラフは平行移動させることで重なる。

また、2回目と3回目を重ねてみると、使用した紙が違ってもかかわらず、図15のように重なった。実験日が同じで、測定環境に大きな差はなかった。

折っていない紙において、使用する紙が違っても、質量推移のグラフは平行移動させることで重なる。

【折った紙と折っていない紙を比べる場合】

折った紙と折っていない紙のグラフは図16のように、すべて重ならなかった。青いグラフは折っていない紙であり、3つのグラフが重なっている。それ以外の赤、橙、黄色のグラフは折った紙のグラフであり、すべて重ならなかった。なお、折った紙のグラフを折っていない紙のグラフに重ねる際、左側の傾きが大きい所は少し一致していたので、その部分を重ねるようにして表した。

まとめると、折った紙において、使用する紙、測定環境が同じ場合でも、質量推移のグラフは平行移動させても重ならなかった。

【測定時間を5分から30分に延長した場合】

5枚の紙を用いて、そのうち2枚を折って、質量推移を調べた。実験を行った日で分けてグラフを重ねたものが、図17、18である。青いグラフが、折っていない紙のグラフであり、黄色のグラフは折った紙のグラフである。図18を見ると折っていない紙のグラフが2つ重なったことが分かる。また、どちらの図でも折った紙と折っていない紙のグラフは重ならなかったことが分かる。

測定時間を30分に延長した場合においても5分の時と同じ結果が得られた。

仮説に反して、横軸方向への平行移動だけでなく、縦軸方向へも平行移動させなければ、グラフは重ならなかった。

実験4：折ってから時間の経った紙は、折っていない紙より質量が大きいのかを調べる。

実験方法の⑤で量った質量から、③で量った質量を引いて差を出し、単位質量当たりの差になるように初めの質量で割ったものを箱ひげ図として示した(図19)。P値は0.48であり、折っていない紙と折った紙の間に、有意な差はみられなかった。

5. 考察

実験1：紙を折るときに伝わる熱について調べる。

擦るように折った紙も、押しつぶすように折った紙も、同じようなグラフが得られたことから紙を擦るように折ることで発生する摩擦熱よりも、手から伝わる熱の影響を強く受けるといえる。

紙を折った数十秒後に、元の温度を下回ったのは、紙が含んでいる水分が蒸発した影響だと考えた。

紙の温度は折った後すぐに下がったことから、実験2以降、紙に与えた熱による実験結果への影響はないと考えられる。

実験2：紙を折る回数と質量の関係について調べる。

紙の保存環境は一定にしていたが、測定環境は固定していなかったことに気づいた。質量測定時の空気中の水分量のグラフ(図11)と紙の質量の増減(図10)を比較すると、推移が似ていたことから、紙の質量は保管時の環境よりも測定時の環境を強く受けると考えた。

実験3：折った紙と折っていない紙の質量の変化の仕方を比べる。

グラフを重ねたとき、折った紙のグラフはすべて、折っていない紙のグラフより上にずれていることに気づいた。折っていない時と比べて紙の吸湿速度が速くなる、紙が最終的に含むことのできる水分量が増加する、の2つのうち、どちらか1つ、あるいは両方が理由ではないかと考えた。後者については実験4にて検証することと

した。

実験4 : 折ってから時間の経った紙は、折ってない紙より質量が大きいのか調べる。

仮説に反し、紙を折っても紙が最終的に含める水分量は変わらなかったのは、紙を折った際に空気中の水分を吸収するという前提が違っていただけではないかと考えた。

6. 結論

紙を折った直後は、手の熱が紙に伝わることで水が蒸発し質量が減少する。また、紙を折ると水分量の変化の仕方は変わるが、その紙が含むことのできる水分量は変わらない。つまり、折った紙も折っていない紙も、最終的な質量は同じだが、その質量にたどり着くまでの質量の変化の仕方が違う。

以上のことより、今後の展望として、当初の課題であった紙のしわの測定に活かす。しわと折り目が似たものならば、実験3のように、しわのない紙としわになった紙のグラフを重ねたものが、どれだけずれているかで、しわの量を測定できるのではないかと考えている。現在、しわの測定法は、調べた限りでは画像処理を用いた方法以外見つからなかったため、ドライヤーとはかりで計測できるようになるのは画期的である。

紙のしわの測定に発展させる際にグラフについての理解を深める必要があるため、仮説に反して、グラフを重ねる際に質量軸方向への移動が必要だったことについて考察を深める。

実験3の結果より、同じ紙について実験回数を重ねると、例外なく、グラフは下にずれていくことに気づいた(図20) …①

このことをもとに、イメージ図を作成した(図21)。この図では、1回目の実験が赤、2回目が青、3回目が緑としている。

先行研究より紙に水分量の平衡が存在することも分かっている。そのため、質量推移のグラフは、平衡状態となる質量に収束する。よって、図21のグラフにおいても収束する質量がそれぞれのグラフに存在する…②

折っていない紙なので、図22のようにグラフは重なる。この後もグラフが重なり続けると仮定するなら、グラフの形状は同じと言える。…③

③は仮定であるため、③が成り立つときと、棄却されるときについて、それぞれ考える。

成り立つとき

①②③より、図21の3つのグラフにおいて、収束する質量はすべて異なり、実験を繰り返すと収束する質量が小さくなっていくことが分かる(図23)。

一方、同じ紙において、折っていない紙と折った紙のグラフを重ねた場合について考える。これについてもイメージ図を作ると図24のようになる。赤いグラフは折っていない紙のグラフで、青は折ったグラフである。すると、折った紙は同じ質量に収束しようとしているように見える。

紙のヒステリシス現象は、温度一定の時の、湿度と紙の水分量との関係について示したものである。この関係から、脱吸湿を行うと、紙の水分量の平衡が変化することが分かる。この平衡の変化は、収束する質量が変化することを意味する。また、先行研究より、激しく脱吸湿を繰り返すと、ヒステリシス現象は収束することが分かっている。つまり、同じ温度湿度において、脱吸湿を繰り返すことで、水分量の平衡が、ある一定値に近づいていくといえる。このことから、折っていない同じ紙において、実験3を繰り返すと、いずれ収束する質量が同値になり、縦軸方向の移動を行うことなくグラフが重なると考えられる。

成り立たないとき

3つのグラフの収束する値が、同じであると仮定したときに限って考える(図25)。

実験を重ねると、グラフが下にずれていくということは、紙の水分量が、すべての時間において前の実験よりも同じ量少ないと言える。紙の質量変化において、乾かしてから時間があまり経っていないうちは、紙の水分量の差の影響を無視できるほど、空気中の水分の影響が大きいので、横と縦の平行移動を行うことでグラフが重なる

と考えた。この説が成り立つとすると、グラフがこの後も重なり続けるという仮定は棄却され、重なっていたグラフはどこかの地点から紙の水分量の差による影響で、少しずつずれが生じると考えられる。また、その際それぞれ同じ質量に収束する（図25のaの地点にそれぞれ収束する）と考えられる。

7. 参考文献

- ・セルロース系繊維の湿潤と膨潤挙動について；呑海信雄，佐々木博昭，笠原勝次
- ・紙と湿度について，5. 紙はなぜ折れるのでしょうか；紙の基本講座—吉田印刷所
- ・紙の試験条件の世界的動向；大蔵省印刷局研究所—山崎秀彦

8. 謝辞

本研究を進めるにあたり，高松第一高等学校 教諭 本田 一恵 先生には終始適切なご指導ご鞭撻を賜りました。ここに感謝の意を表します。

9. 図表, 画像

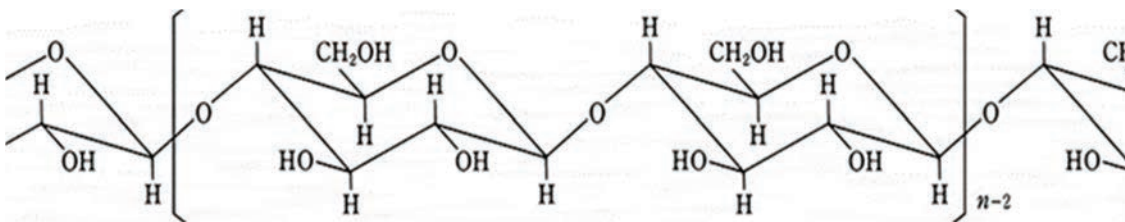


図1 紙の基本構造



図2 紙を折る(先行研究)

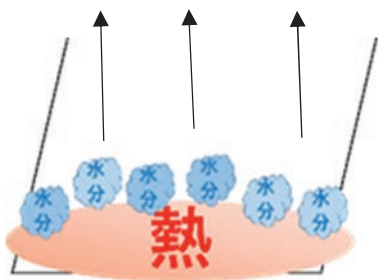


図3 仮説1



図4 仮説2

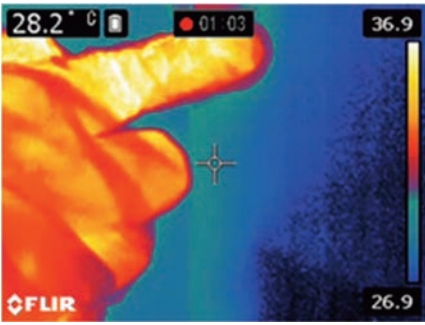


図5 サーモグラフィで撮った紙の温度変化の様子



図6 実験2の準備物

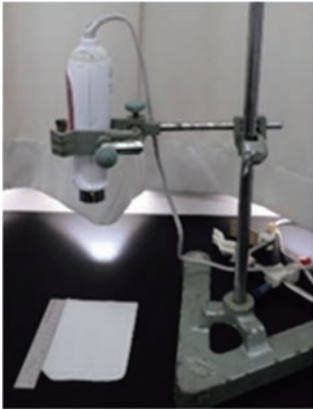


図7 実験3で使用した装置



図8 精密はかりに紙を置いた時の様子

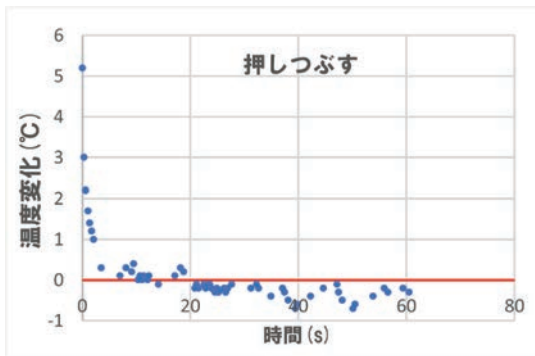


図9 実験1 結果 時間と温度変化の関係

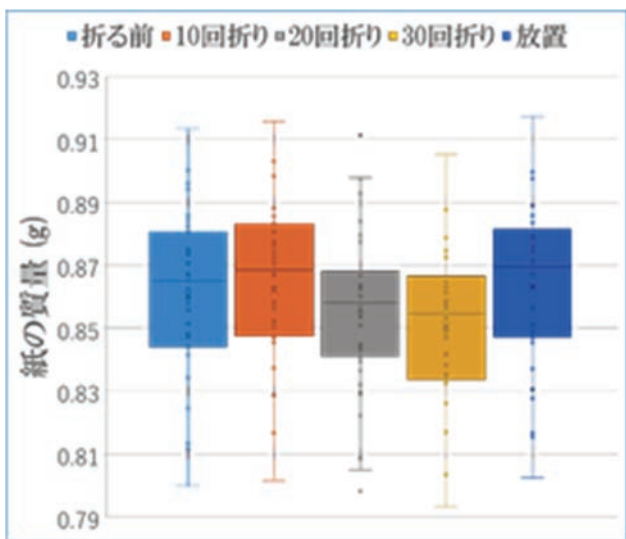
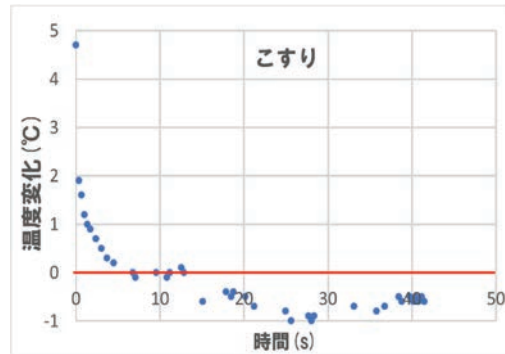


図10 実験2 結果 折った回数毎の紙の質量



図11 図10に対応する空気中の水分量

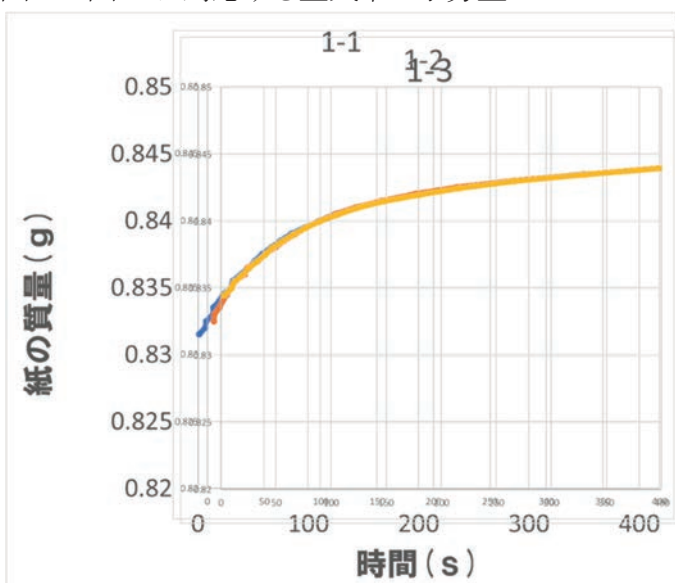


図12 実験3の結果 折っていない紙で乾かす時間が異なるグラフ同士を重ねたもの(1回目)

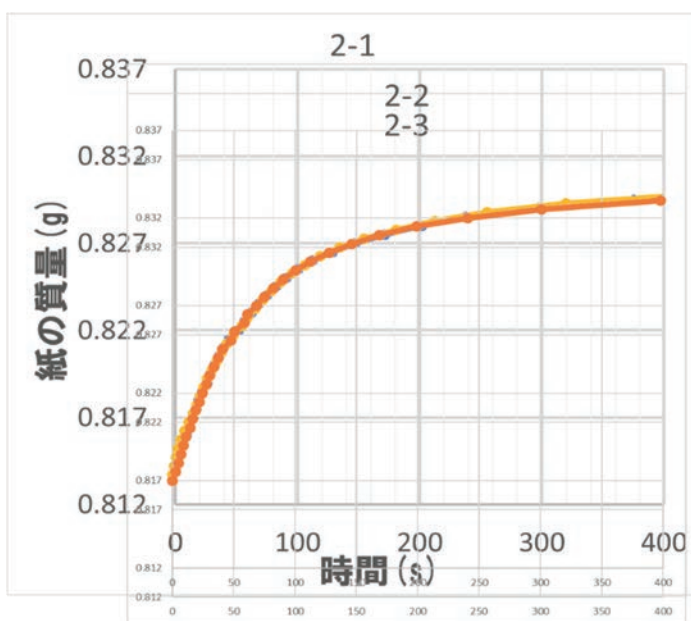


図13 実験3の結果 折っていない紙で乾かす時間が異なるグラフ同士を重ねたもの(2回目)

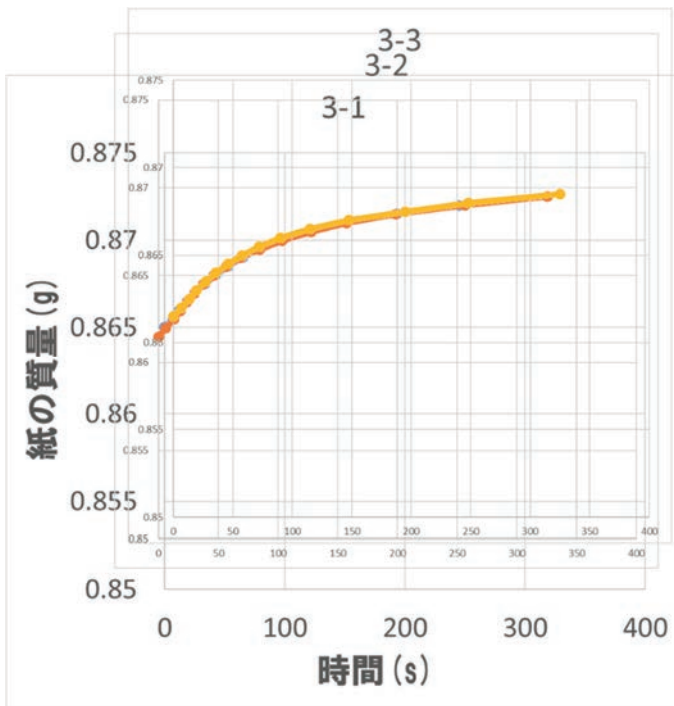


図14 実験3の結果 折っていない紙で乾かす時間が異なるグラフ同士を重ねたもの(3回目)

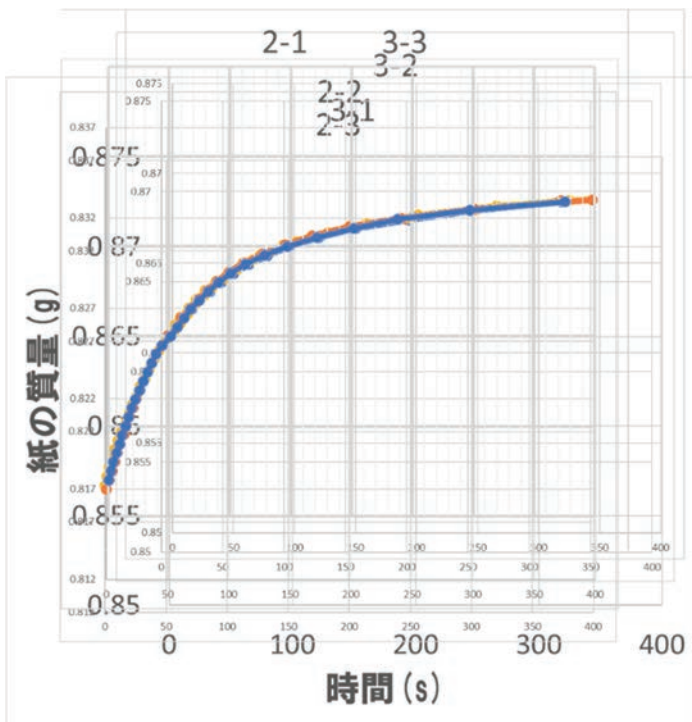


図15 実験3の結果 図13と図14を重ねたもの

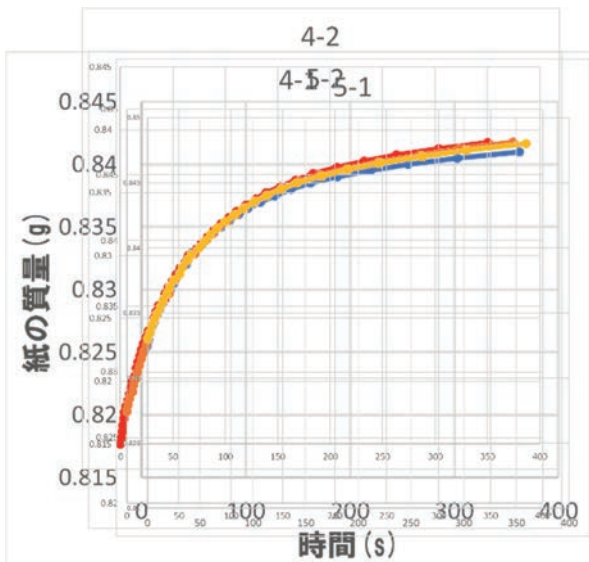


図16 実験3の結果 折っていない紙と折った紙のグラフを重ねたもの

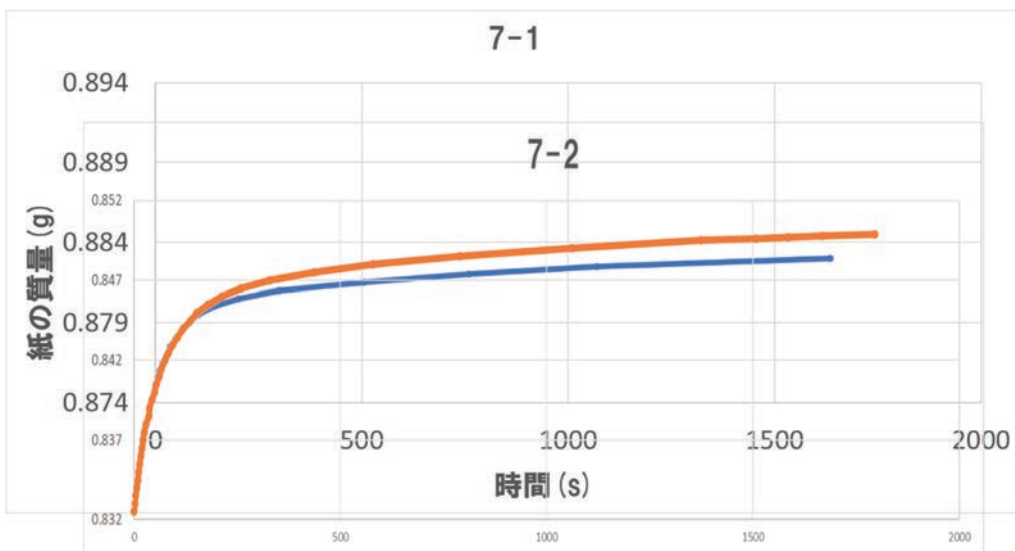


図17 実験3の結果 測定時間を5分から30分に延長したもの(一日目)

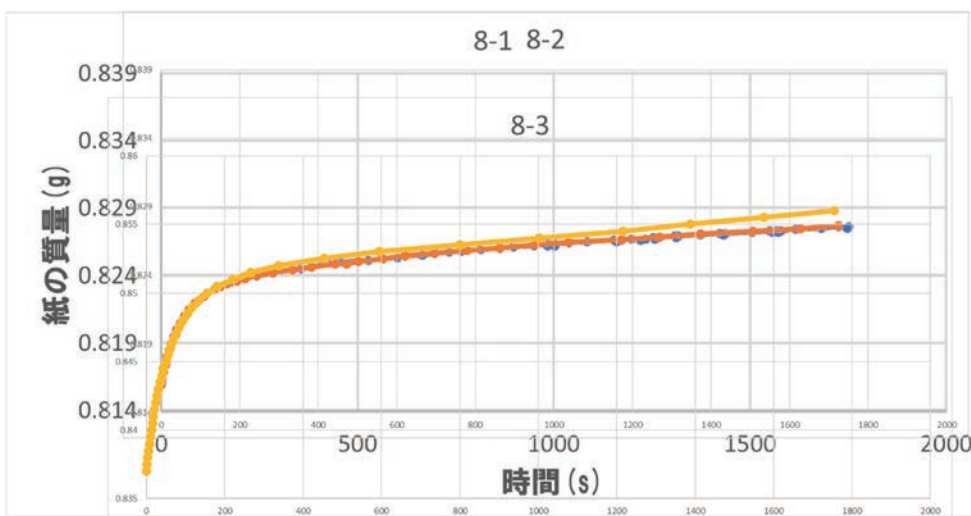


図18 実験3の結果 測定時間を5分から30分に延長したもの(二日目)

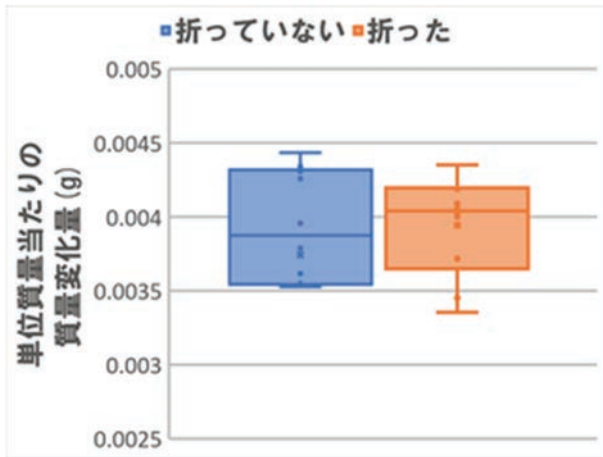


図19 実験4の結果 折っていない紙と折った紙の質量変化量

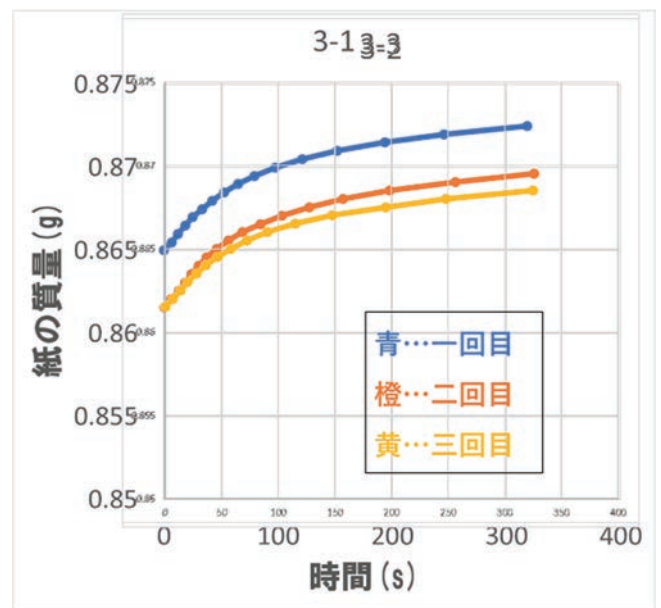
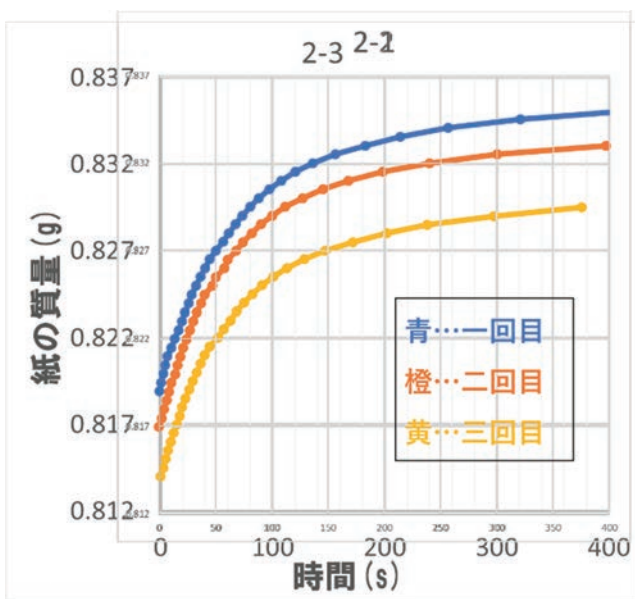
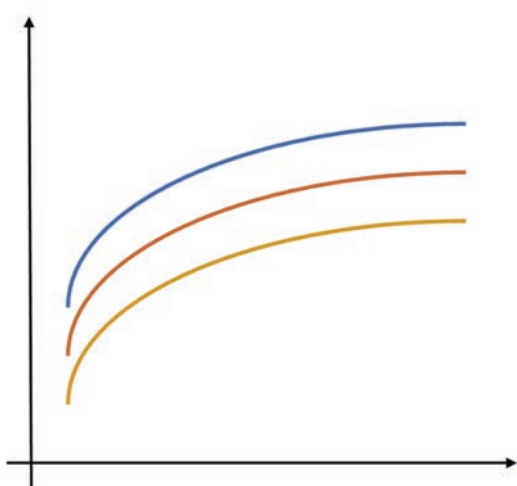
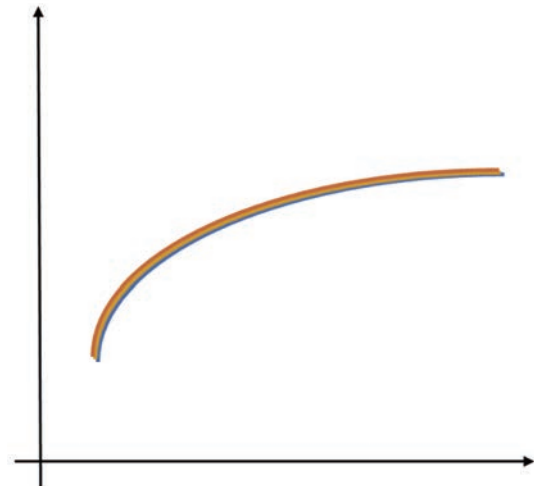


図20



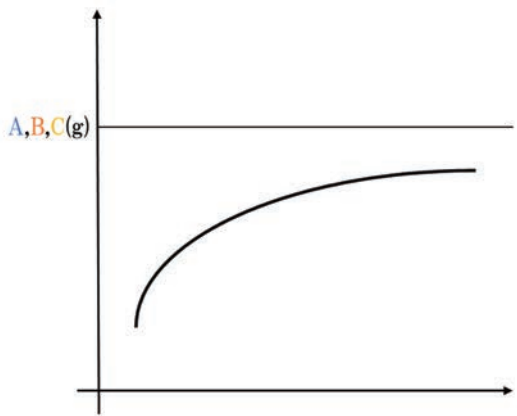
重ねる前の折っていない紙のグラフ



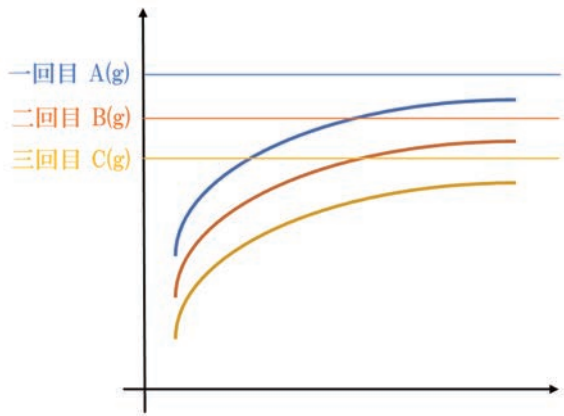
折っていない紙同士を重ねたもの

図21

図22

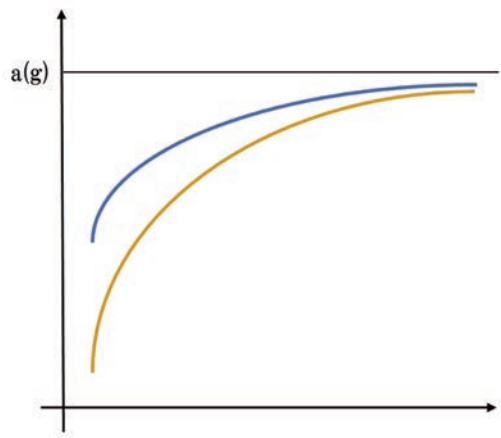


折っていない紙同士を重ねたもの
グラフは重なったまま収束すると仮定



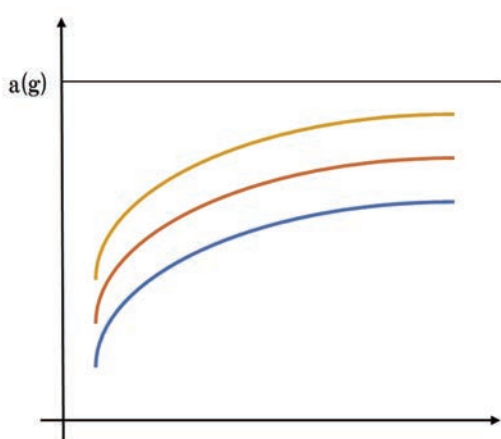
重ねる前の折っていない紙のグラフ
グラフは重なったまま収束すると仮定

図23

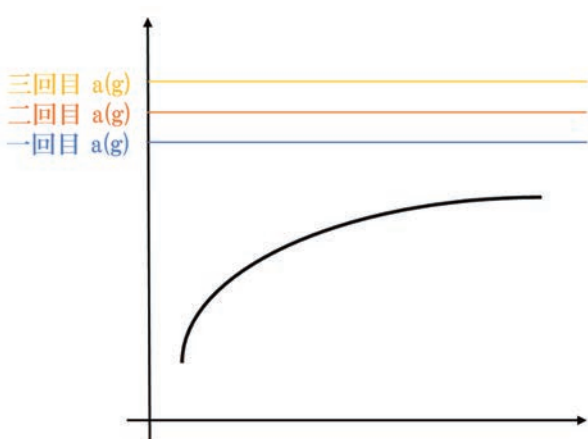


重ねる前の折っていない紙と折った紙のグラフ

図24



重ねる前の折っていない紙のグラフ
収束する質量は変わらないと仮定



折っていない紙同士を重ねたもの
収束する質量は変わらないと仮定

図25