

お風呂で発電して湯加減を可視化しよう！

山梨大学大学院医学工学総合教育部
機械システム工学専攻武田研究室

代表者氏名 東ヶ崎 貴之（機械システム工学専攻 1年）
松田 直樹（機械システム工学科 4年）

1. はじめに

日本では、浴槽にお湯を張って風呂に入るという習慣がある。一般的な浴槽の湯量は約 200ℓとされ、銭湯ではさらに膨大な量の湯が使用される。天然温泉の場合は、自然の地熱エネルギーであるが、家庭や銭湯では化石燃料等の熱エネルギーを利用して 40℃以上のお湯を作ることになる。ところが、現状では風呂に利用した後の 40℃近い熱エネルギーは全て捨てられてしまう。

そこで、ヒートパイプとペルチェ素子を用いて、捨てられる約 40℃のお湯が保有する熱エネルギーから温度差発電によって、電気を作り出し、それを何か別のことに有効利用できないかと考えた。今回提案する実験は、捨てられる熱エネルギーの利用ということではないが、温度差発電により得た電気を用いて、フェノールフタレイン溶液の電気分解による変色を利用した可視化実験である。ここでは、子供たちがお風呂で楽しむおもちゃを製作することを念頭に実験を計画し、実施した結果を報告する。

2. 原理及び発電装置

2-1. ヒートパイプ

ヒートパイプとは図 2.1 に示すように、密閉容器内に少量の液体（作動液）を真空密封し、内壁に毛細管構造（ウイック）を備えたもので、ヒートパイプの一部が加熱されると、次のような現象が起きる。

- (1) 加熱部で作動液が蒸発（蒸発潜熱の吸収）
- (2) 低温部に蒸気が移動
- (3) 蒸気が低温部で凝縮（蒸発潜熱の放出）
- (4) 凝縮した液が毛細管現象で加熱部に還流

以上の一連の相変化が連続的に生じ、熱がすばやく移動することになる。

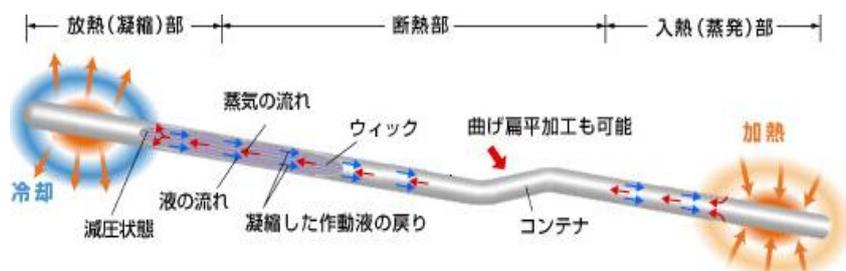


図 2.1 ヒートパイプの仕組み(NTEC 株式会社 HP より引用)

2-2. ペルチェ素子

2種類の金属の接合部に電流を流すと、片方の金属からもう片方へ熱が移動するというペルチェ効果を用いた半導体素子である。また、逆に、温度差を与えることで電圧を生じさせることもでき、これをゼーベック効果というが、熱電対の原理である。

2-3. 微小温度差発電装置

2-1、2-2章で説明したヒートパイプとペルチェ素子を用いることによって発電が可能となるが、具体的にはペルチェ素子の高温側にはお湯の熱エネルギーを与え、低温側をヒートパイプによる熱移動を利用して冷却し、ペルチェ素子の両側に温度差を与えることにより電気を作り出すことができる。図 2.2 に原理の概略を示す。発電装置の製作に当たっては、後述の通りフェノールフタレイン溶液を発色させるために必要な電圧として 1.5V以上の電圧を得ることを目標とした。

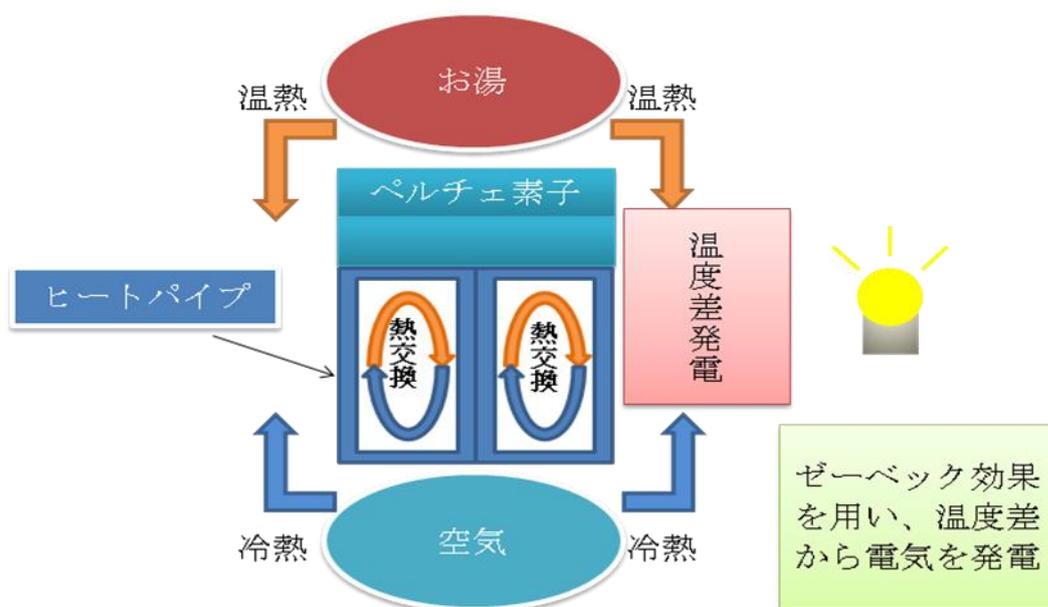


図 2.2 微小温度差発電装置の原理

2-4. 可視化方法

pH 指示薬として知られるフェノールフタレインを添加した電解液流中で直流電圧をかけて電気分解すると陰極近傍の溶液が赤色に発色するという性質がある。これは、フェノールフタレイン溶液が電気分解によって発生した水酸化物イオンと反応して発色することが原因であり、代表的な電解液として食塩水がある。食塩水では、その濃度を変化させることによって、フェノールフタレイン溶液の発色に必要な電圧を変えることができる。事前に行った調査検討では、今回の温度差発電装置で発生する電力の電圧は小さいと予想されたが、調整が必要ではあるものの、少なくとも 1.5V 程度の電圧を得ることができれば、十分に発色するとの結論に至った。

3. 実験の概要

今回提案する実験では、図 3.1 に示すような子供がお風呂に浮かべて楽しめるアヒルのおもちゃとして、湯温が 40℃程度になると、頬が赤くなるアヒルのおもちゃを温度差発電装置とフェノールフタレイン溶液を用いて製作することとした。

この実験を成功させるためには、

- (1) お風呂のお湯を使った温度差発電装置を製作する！
- (2) 電圧とフェノールフタレイン溶液の発色パターンとの定量的な関係を求める！
- (3) フェノールフタレイン溶液と温度差発電装置を組み合わせ、お風呂の湯温が約 40℃になると赤くなる容器を試作する！
- (4) アヒルの頬の部分に容器を組み込んで、お風呂に浮かべることができるおもちゃを製作する！

今回の実験を以上の 4 段階に別けて準備を進め、1 つずつ目標を達成しながら、最終的な目標である、微小な温度差による熱エネルギーを利用する可視化実験を実施した。

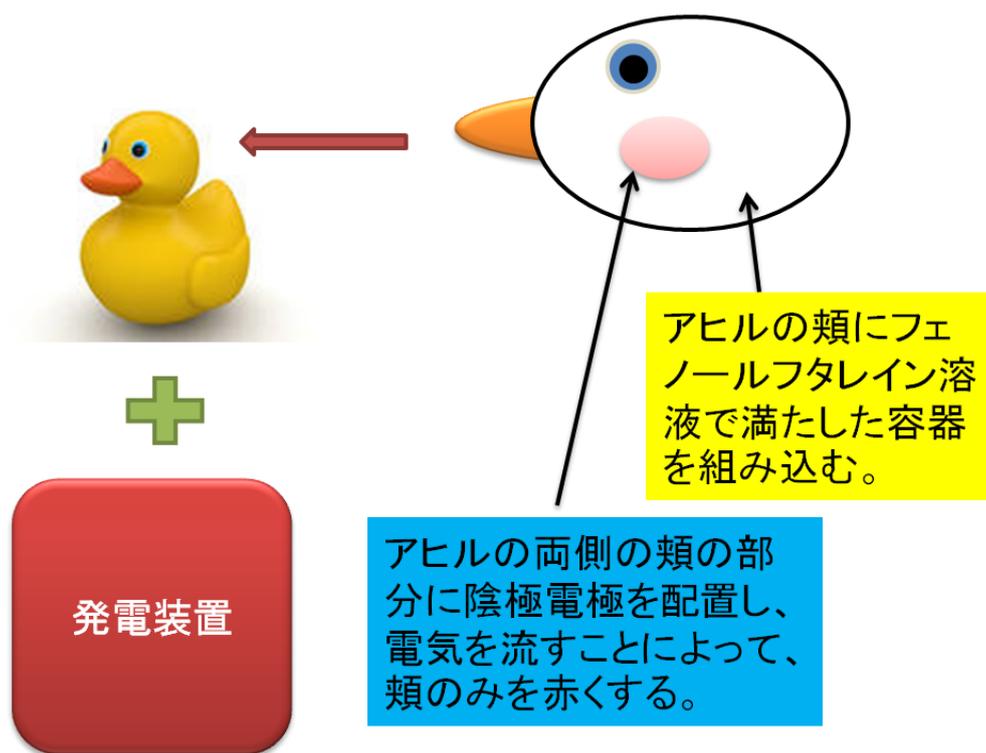


図 3.1 アヒルのおもちゃを用いた微小温度差可視化装置

4. 実験方法及び実験結果とその考察

4-1. 基礎実験

ペルチェ素子として図 4.1 に示す TEP1-12656-0.8 を使い、その基本性能を表 4.1 に示す。

表 4.1 ペルチェ素子の基本性能 発電能力（高温側：230℃、低温側：50℃の時）

開放電圧	8.7V
内部抵抗	0.7~1.2Ω
マッチングロード出力電圧	4.2V
マッチングロード出力電流	2.5A
マッチングロード出力	10.5W
基準熱流	240W
基準熱流密度	8W/cm ²

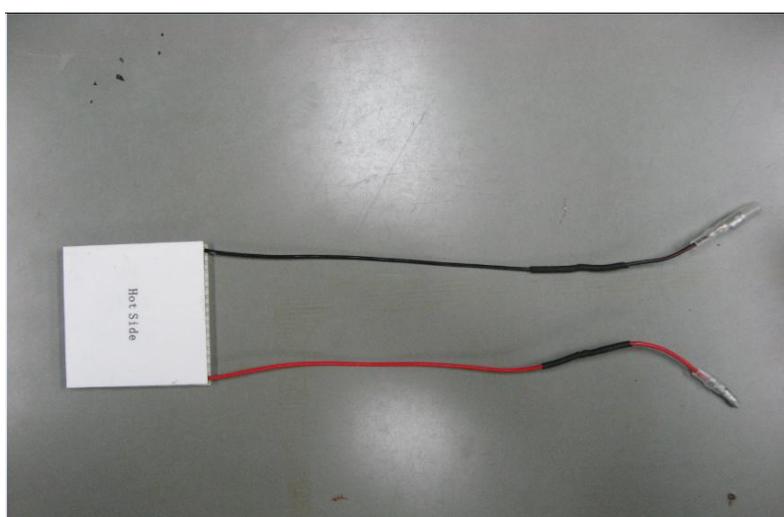


図 4.1 ペルチェ素子 (TEP1-12656-0.8)

ペルチェ素子の冷却側に設置するヒートパイプを搭載した高性能ヒートシンクとして図 4.2 に示す CPU クーラー（商品名：NINJA3）を用い、高温側と低温側の温度差を大きくすることにより発電効率を向上させた。

温度差発電装置を図 4.3 に示すが、ペルチェ素子とヒートシンクを伝熱グリスで接着したものである。基礎実験として、ペルチェ素子 1 枚による発電量を確認した。高温側には 40℃のお湯、外気温が 15℃の場合では、計測した電圧は 0.34V であった。また、ヒートシンクを用いずペルチェ素子単体で上記と同条件で計測したところ 0.24V だったことから、素子の温度差を大きくするためにはヒートパイプ搭載型のヒートシンクが有効であることが分かる。

これより、目標とする 1.5V 以上の電圧を得るためには、ペルチェ素子を複数枚、直

列に接続することが必要であることが分かった。

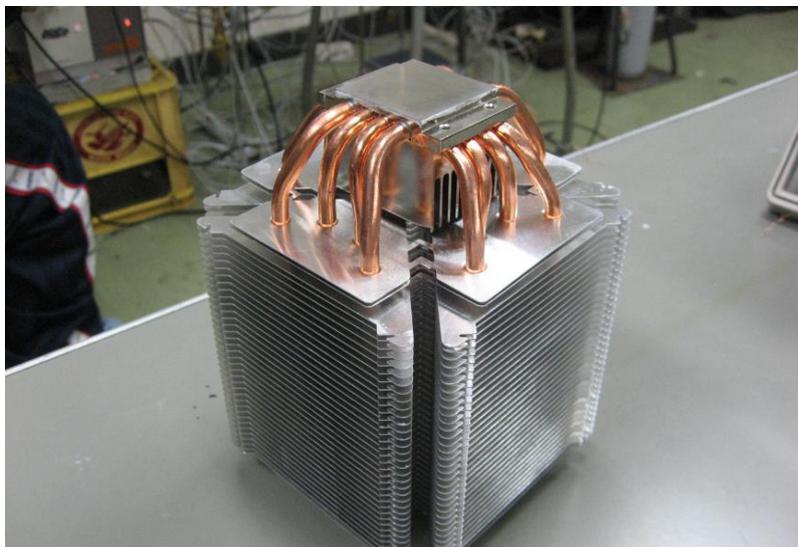


図 4.2 CPUクーラー（商品名：NINJA3）

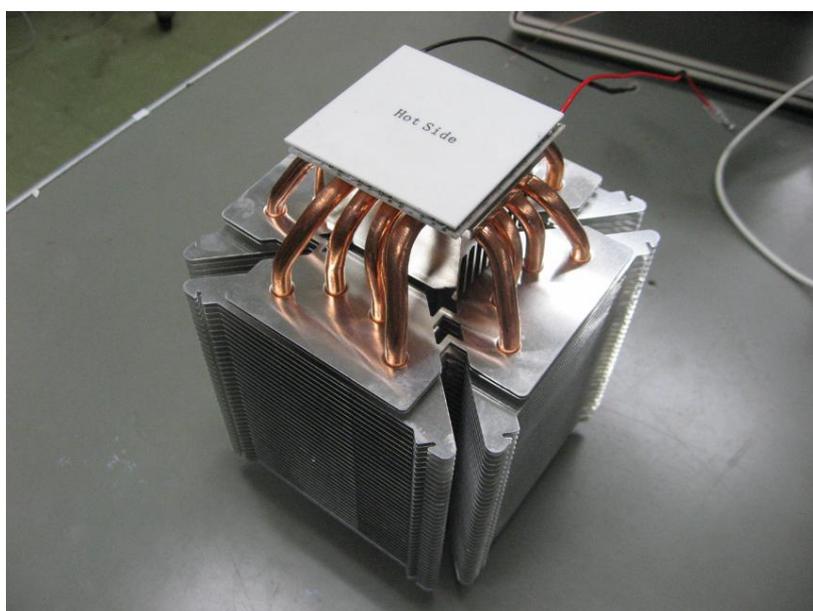


図 4.3 温度差発電装置

4-2. ペルチェ素子が 2 枚の場合

4-2-1. 実験方法

基礎実験からペルチェ素子が複数枚必要であることが分かったので、ペルチェ素子をどのようにヒートシンクと接続すれば最も発電効率を高くすることができるのか、また、

目標とする 1.5V 以上の電圧を得るためには、ペルチェ素子が何枚必要になるのかについて検討した。

まず、ペルチェ素子の配置方法に関して、図 4.4、4.5 に示すようにペルチェ素子を重ねた場合と並列に並べた場合でどちらの発電効率が高いかを調べた。実験では、40°C のお湯を用い、外気 21.3°C の場合について計測した。また、ペルチェ素子を並列に接続する場合に、ヒートシンクの接触面が小さいため、2 枚を一緒に接続することができないことから、素子の間に熱伝導率の大きい銅板を挟んで計測した。

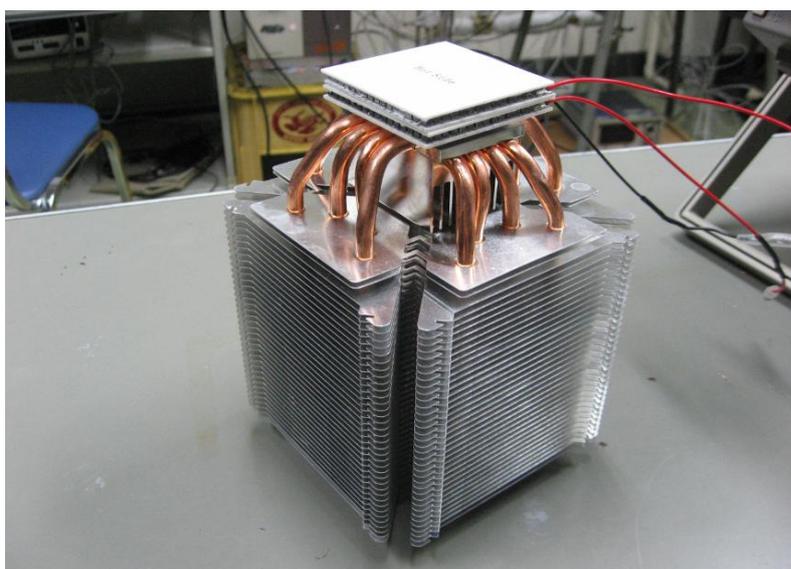


図 4.4 ペルチェ素子を重ねて接続した温度差発電装置

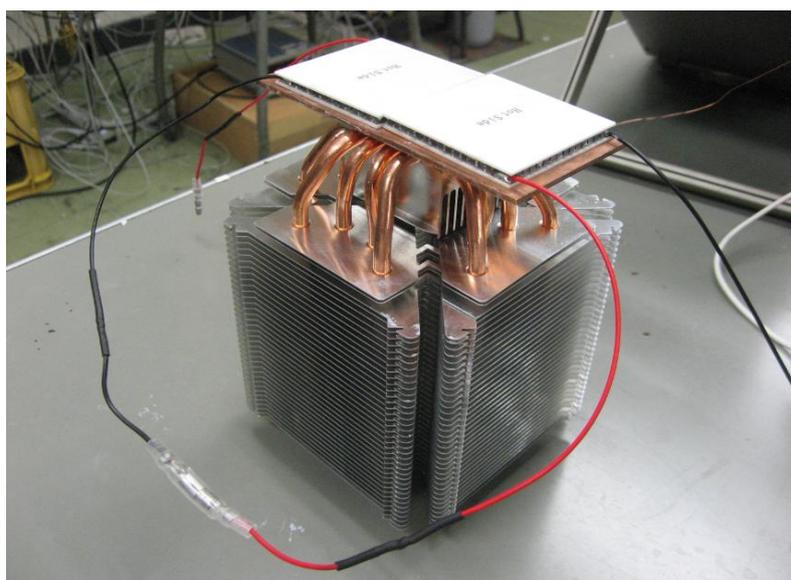


図 4.5 ペルチェ素子を並べて接続した温度差発電装置

4-2-2. 実験結果と考察

配置による発電量の違いを表 4.2 に示すが、実験結果から並列接続の発電効率が高いことが分かった。また、この時にペルチェ素子 1 枚の時の電圧を計測したところ、0.21V だったことから、1 枚の時に比べて約 1.8 倍の電圧が得られた。このことからペルチェ素子を並列に並べた場合には、ペルチェ素子枚数と電圧との関係が比例するのではないかと考えることができる。電圧が 2 倍にならなかった理由は、ペルチェ素子とヒートシンクとの間に銅板を挟んだことにより、直接ペルチェ素子をヒートシンクと接続した場合に比べて、冷却効率が多少低下したのではないかと考えている。

表 4.2 配置による発電量の違い

	水温[°C]	外気温[°C]	温度差[°C]	電圧[V]
重ねて接続	40.0	21.6	18.4	0.301
並べて接続	40.0	21.2	18.8	0.384

この検討結果より、1.5V 以上の電圧を得るためには少なくとも外気を 15°C 程度とし温度差を 25°C とする場合は、ペルチェ素子が 5 枚もしくは 6 枚必要となる。しかしながら、ヒートシンクとの接触面が小さいことからペルチェ素子の枚数を多くすると、発電装置が大型となってバランスが悪くなる。

そこで、低入力電圧の昇圧回路(MHT77X-5V-KIT)を用いることによって電圧を昇圧する方法を導入した。ただし、低入力電圧の昇圧回路であっても 0.8V 程度の電圧は必要となるため、ペルチェ素子を 4 枚にして、昇圧回路が作動するかどうかを検討した。

4-3. 昇圧回路を用いた実験

ペルチェ素子を 4 枚として、昇圧回路が作動するのかどうかを調べた。図 4.6 に製作した昇圧回路(MHT77X-5V-KIT)を示し、図 4.7 に昇圧回路の回路図を示す。表 4.3 に使用した半導体部品を示す。この昇圧回路は、最低駆動電圧として 0.8V から作動し、5V 一定に昇圧することが可能である。

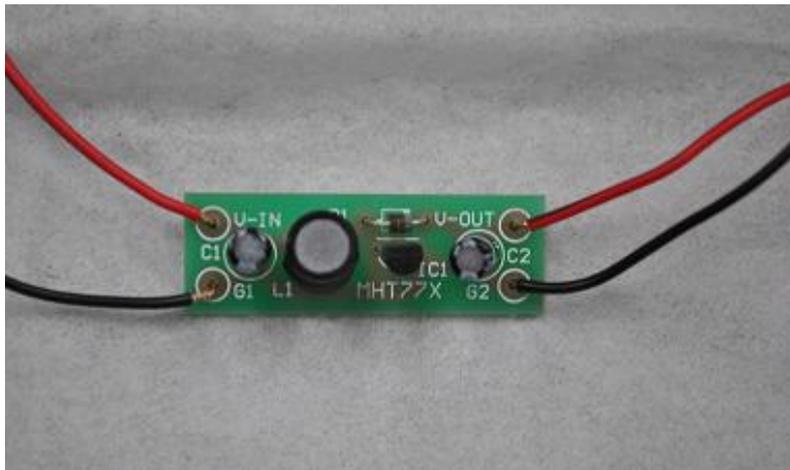


図 4.6 昇圧回路(MHT77X-5V-KIT)

表 4.3 仕様した部品表

部品番号	メーカー	型番	仕様
IC1	HOLTEK	HT7750A	5V昇圧レギュレーター
C1	ルビコン	25YK47	ケミコン47 μ /25V
C2	ルビコン	50YK22	ケミコン22 μ /50V
D1	ルネサス	11EQS03L	SBダイオード
L1	リンクマン	LLI-8X10-101	インダクター100 μ H

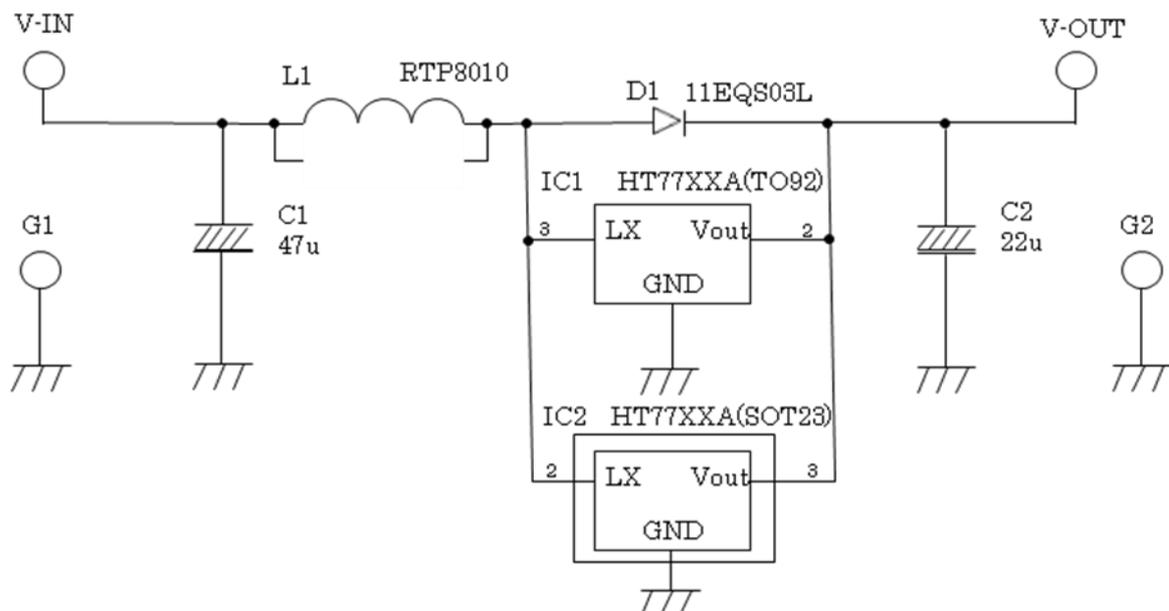


図 4.7 回路図(MHT77X-5V-KIT)

4-3-1. 実験方法 1

図 4.8 のように 4 枚のペルチェ素子をヒートシンクに接続し、0.8V の電圧を得るために必要な温度差を求めた。実験条件として、外気の温度を計測しながら、素子の高温側を 26℃から 2℃間隔で 40℃まで温度を上昇させて電圧を計測した。

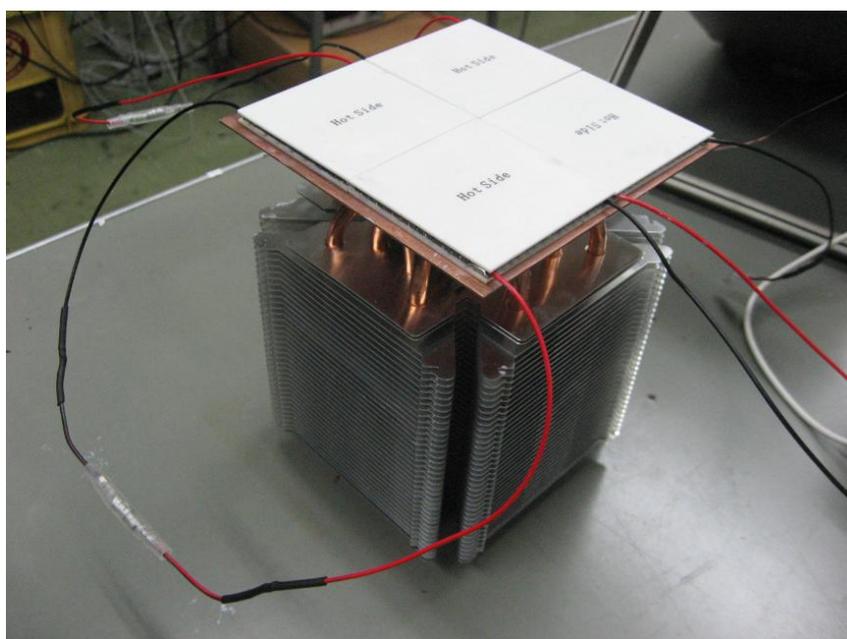


図 4.8 ペルチェ素子 4 枚の温度差発電装置

4-3-2. 実験結果及び考察

実験結果を表 4.4 に示し、図 4.9 に温度差と電圧との関係を示す。これより、水温が 38℃以上で温度差が約 21℃以上の場合に 0.8V の電圧を得ることができたことから、4 枚のペルチェ素子により昇圧回路を作動させることが可能であることが分かった。

表 4.4 温度変化による電圧の変化

水温[℃]	外気温[℃]	温度差[℃]	電圧[V]
40.0	16.3	23.8	1.09
38.0	16.2	21.8	0.884
36.0	16.2	19.8	0.772
34.0	16.2	17.8	0.673
32.0	16.2	15.8	0.564
30.0	16.2	13.9	0.468
28.0	16.2	11.8	0.394
26.0	16.1	9.90	0.312

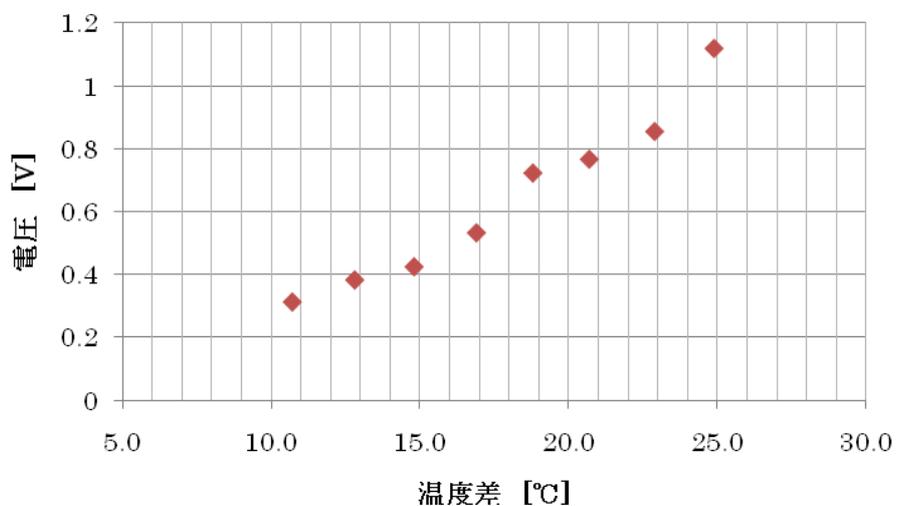


図 4.9 温度差により発電した電圧の変化

4-3-3. 実験方法 2

図 4.10 のように昇圧回路を発電装置と接続し、何 V から昇圧させることができるかを計測した。実験条件として、外気温を 15°C とし、素子の高温側を 26°C に設定し、 2°C 間隔で温度を 40°C まで上昇させて電圧を計測した。また、昇圧を開始した付近では、 1°C 刻みの温度変化を与えて、電圧を計測した。計測は 2 回行い平均値を求めた。

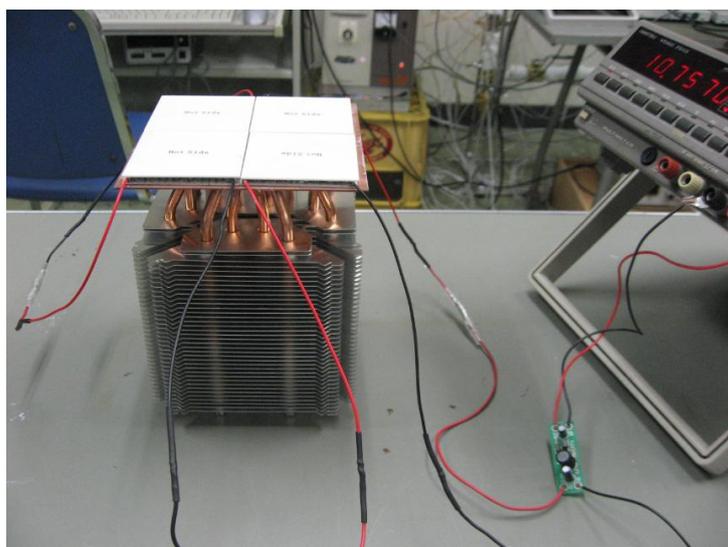


図 4.10 接続した温度差発電装置と昇圧回路

4-3-4. 実験結果及び考察

表 4.5 に実験結果を示す。図 4.11 には昇圧しない場合、図 4.12 には昇圧した場合の電圧変化を示す。最初、0.8V から昇圧するものと考えていたが、実験結果から 0.42V から昇圧させることが可能であることが分かった。また、4 枚のペルチェ素子では、約 13°C の温度差により、昇圧させるために必要な 0.42V を得ることができた。これまでの予想より低い 0.42V という電圧から昇圧させることができるため、外気の温度にも依存するが、2 枚や 3 枚のペルチェ素子でも昇圧させることができることが分かった。図 4.11 から分かるように昇圧回路はある一定の電圧から急激に電圧を上げることができるため、外気温度の違いによってペルチェ素子の枚数を変えることにより、40°C 前後で昇圧させるように製作すれば、34~35°C の湯温では変化せずに 40°C 前後の湯温の場合にのみ電圧を変化させることも可能である。

表 4.5 昇圧回路を用いた場合の温度による電圧変化

水温[°C]	外気温[°C]	温度差[°C]	電圧[V]
40.0	16.3	23.8	4.98
38.0	16.2	21.8	4.98
36.0	16.2	19.8	4.98
34.0	16.2	17.8	4.98
32.0	16.2	15.8	4.98
30.0	16.2	13.9	4.98
28.0	16.2	11.8	0.394
26.0	16.1	9.90	0.312

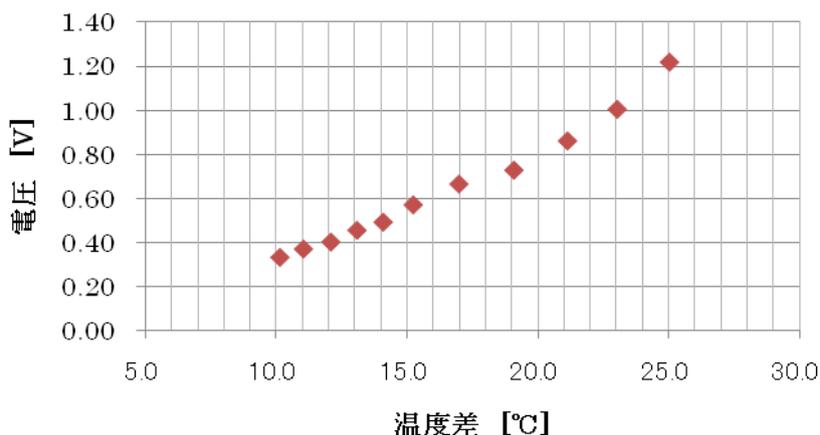


図 4.11 昇圧していない場合の水温の変化による電圧変化

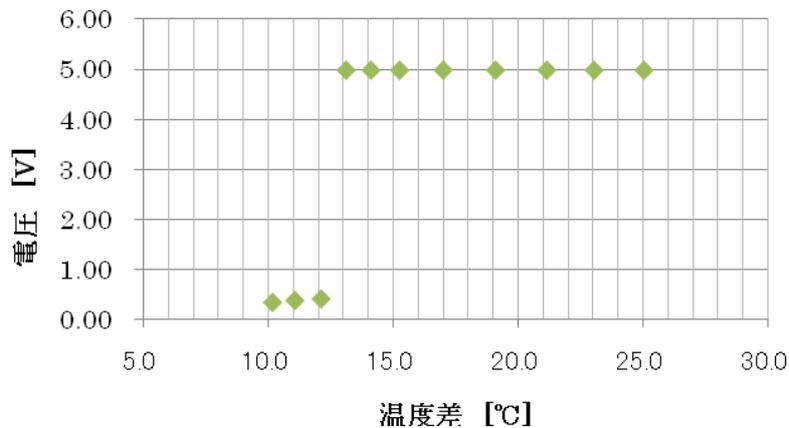


図 4.12 昇圧回路を用いた場合の温度差の変化による電圧変化

今回製作した微小温度差発電装置では、1.5V以上の電圧を得ることのできる発電装置を目標として実験を行ってきたが、ヒートパイプ搭載型のヒートシンクと4枚のペルチェ素子を接続した発電装置に5Vの昇圧回路を組み合わせることで、約13°C以上の温度差を確保することができれば5Vの電圧を得ることに成功した。

5. 電圧とフェノールフタレイン溶液の発色の関係

次に、フェノールフタレイン溶液を電気分解によって発生させた水酸化物イオンとフェノールフタレインの化学反応を利用して赤色に発色させる原理を利用して、電圧と発色の関係を求める実験を行った。

ここでは、水に溶けやすく、電気分解により水酸化物イオンを発生する物質としてNaCl(塩化ナトリウム)、 $C_6H_{10}CaO_6$ (乳酸カルシウム)の2種類の物質を用い、食塩水と乳酸カルシウム水溶液のそれぞれの濃度の違いによってフェノールフタレイン水溶液を発色させるために必要な電圧を調べた。より低電圧で変化する濃度のパターンを見つけ、最適な物質濃度を選定することを目標とした。

5-1. 実験方法 1

- ①水 50ml に塩化ナトリウムを 0.01 g 加え塩化ナトリウム水溶液を作成し、そこにフェノールフタレイン水溶液を 1.5ml 加えて、安定化電源装置より 1V、2V、3V、5V と電圧を与えることにより、1 分後どのようにフェノールフタレイン水溶液が変化するかを観察する。
- ②①と同様の実験方法を塩化ナトリウムの量を 0.1、0.5 g と変えて変化を観察する。
- ③フェノールフタレイン溶液の濃度が可視化に影響するのかを調べるために、①、②の実験方法をフェノールフタレイン溶液の投入量を 1.5ml から 3ml に変え実験を行う。

④①と②の実験方法を乳酸カルシウムで行う。

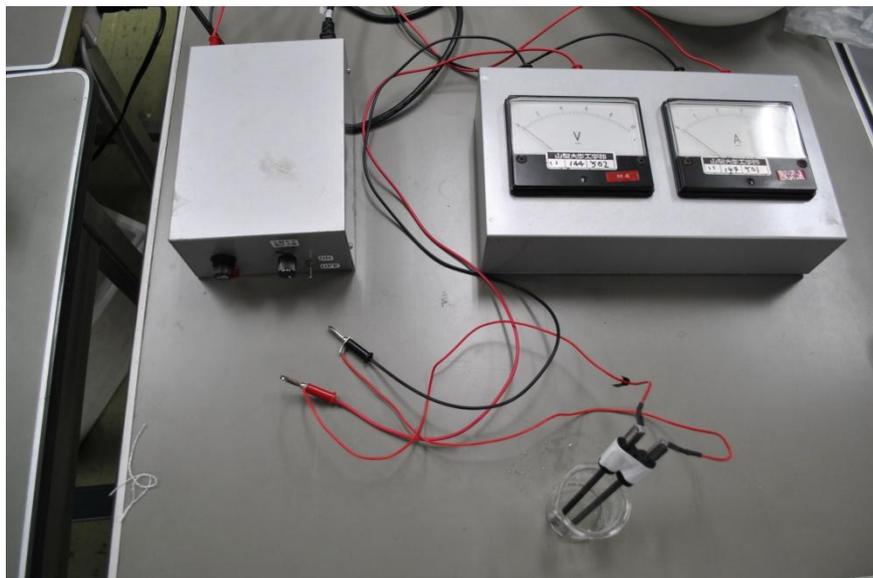


図 5.1 使用した実験装置

5-2. 実験結果、及び考察

①、②についての実験結果を示す。

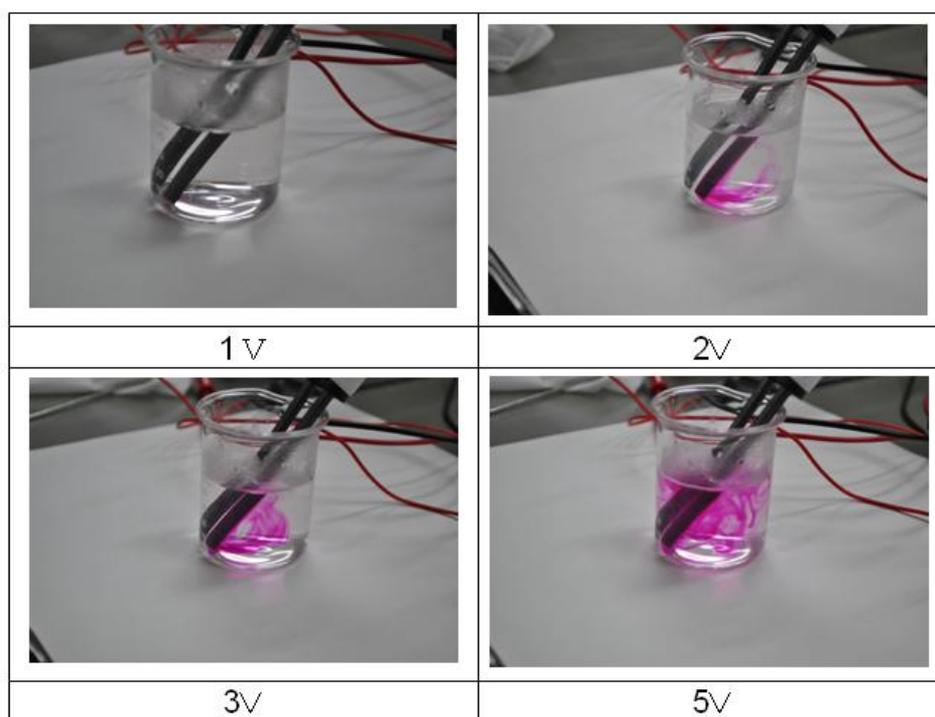


図 5.2 Fe 1.5ml、NaCl 0.01g の可視化実験

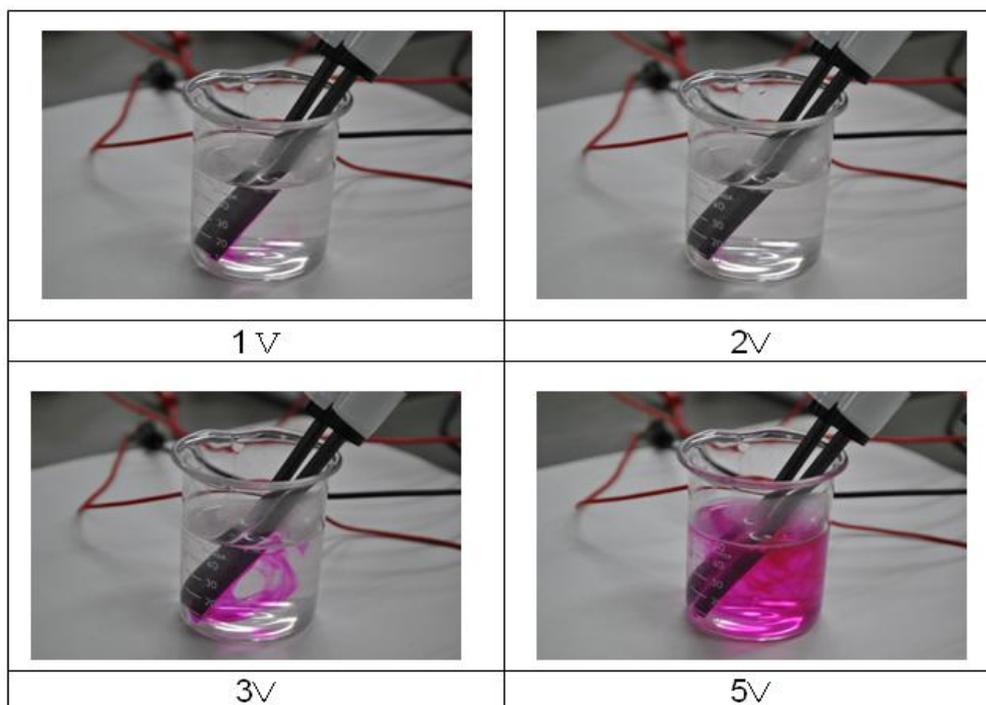


図 5.3 Fe 1.5ml、NaCl 0.1g の可視化実験

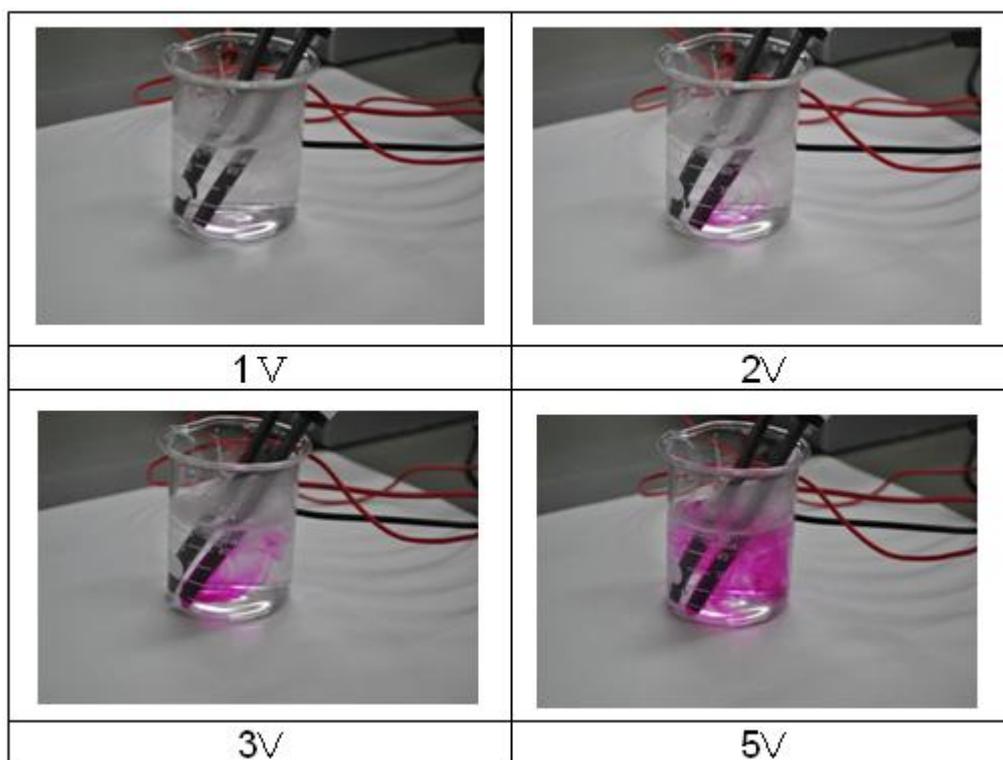


図 5.4 Fe 1.5ml、NaCl 0.5g の可視化実験

③についての実験結果を示す

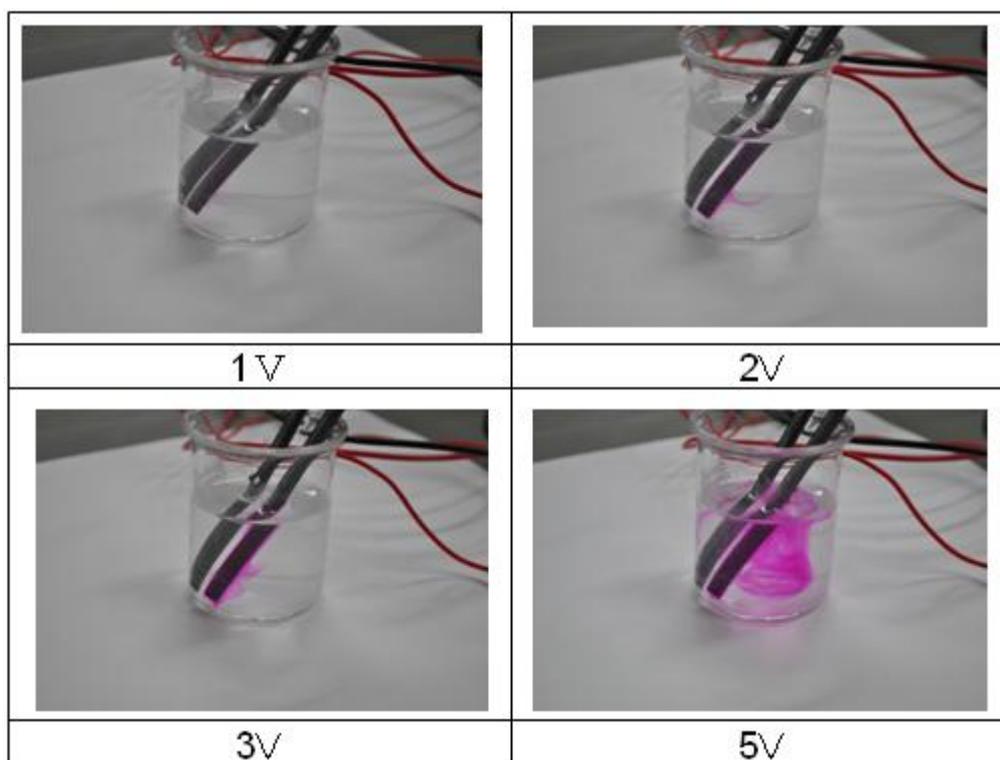


図 5.5 Fe 3.0ml、NaCl 0.01g の可視化実験

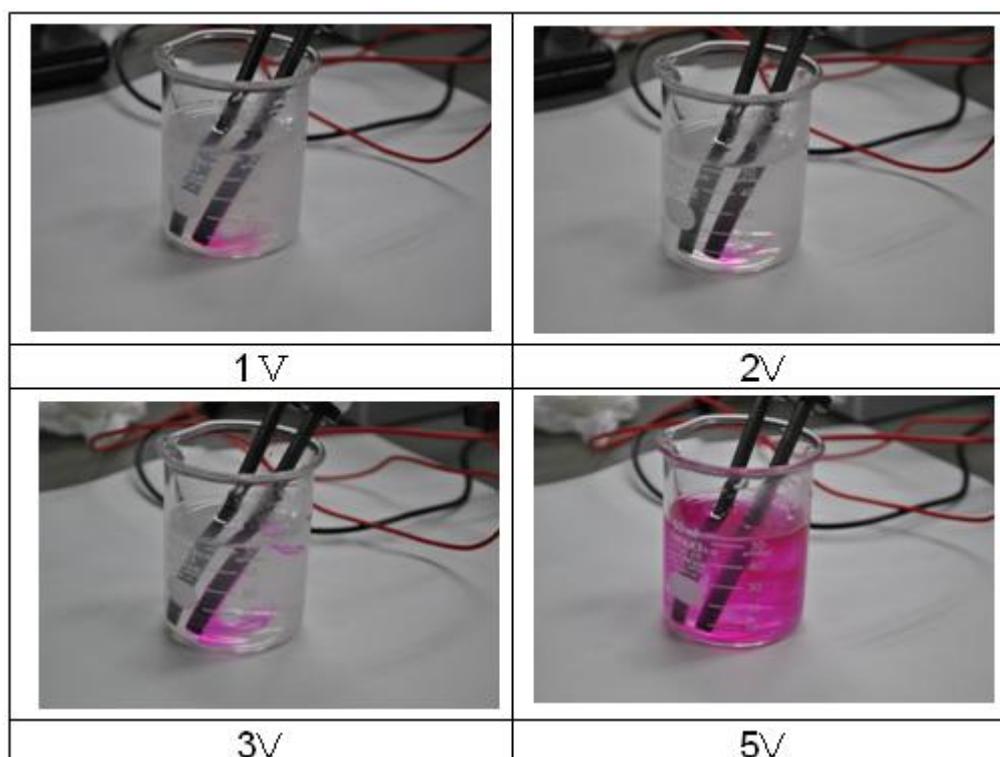


図 5.6 Fe 3.0ml、NaCl 0.1g の可視化実験

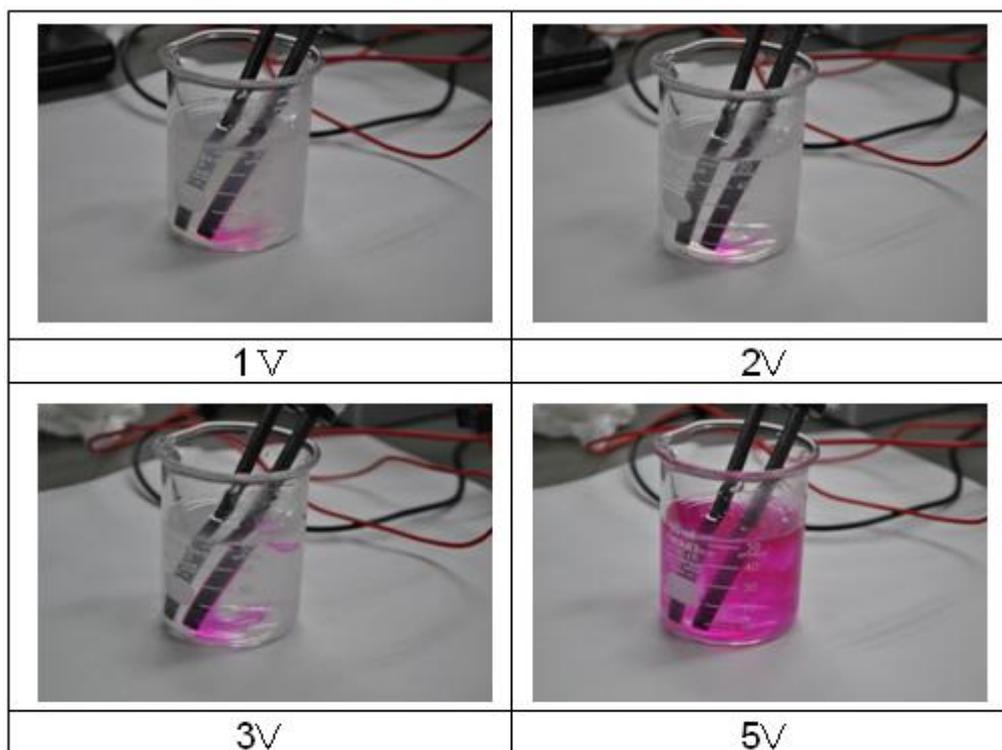


図 5.7 Fe 3.0ml、NaCl 0.5g の可視化実験

④についての実験結果を示す。

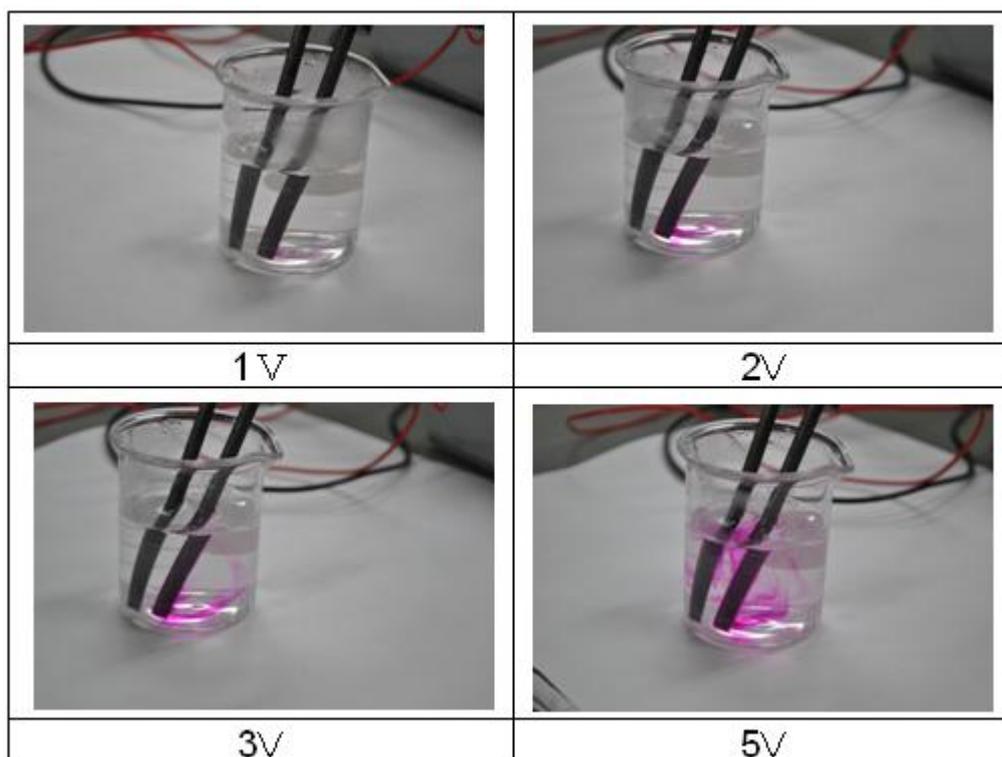


図 5.8 Fe 1.5ml、 $C_6H_{10}CaO_6$ 0.01 g

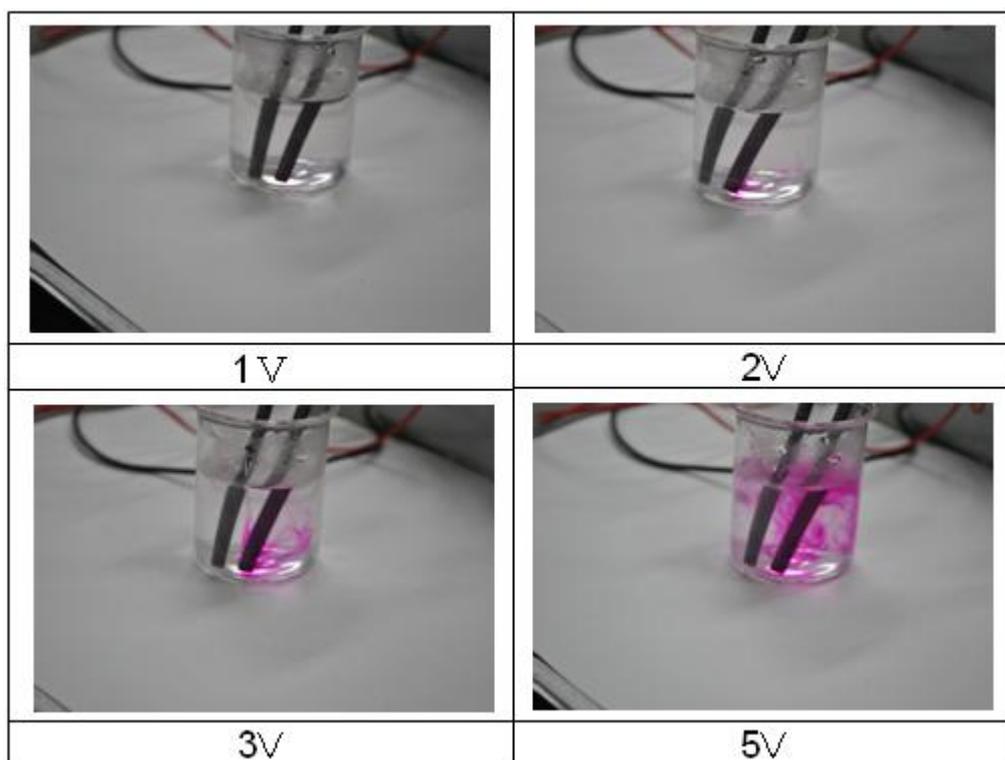


图 5.9 Fe 1.5ml、 $C_6H_{10}CaO_6$ 0.1 g

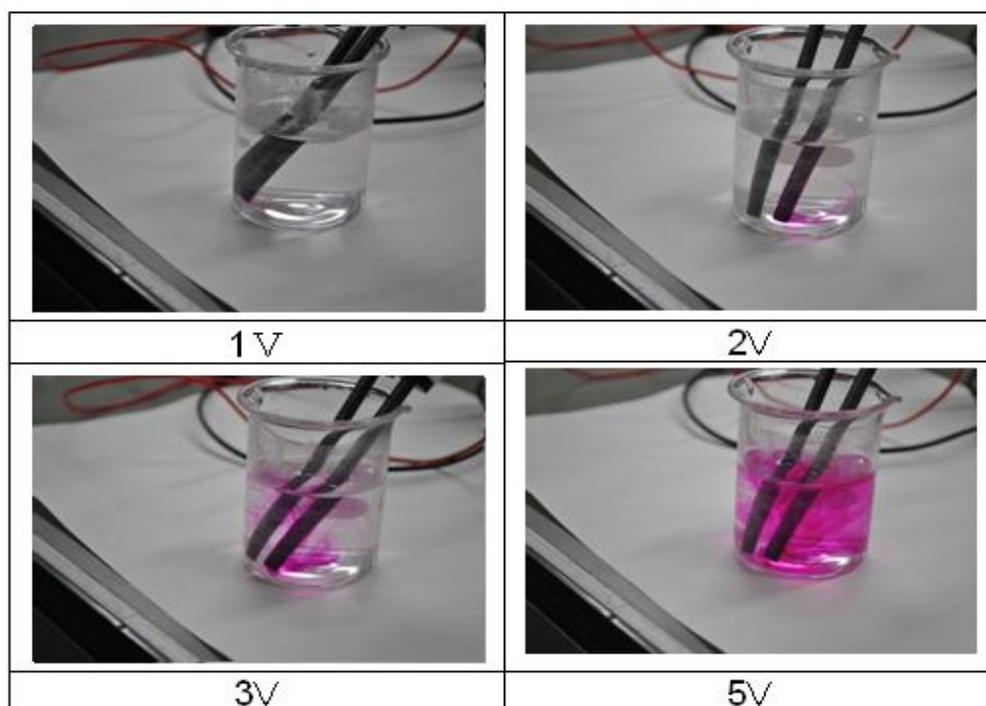


图 5.10 Fe 1.5ml、 $C_6H_{10}CaO_6$ 0.5 g

実験結果から、電圧と濃度が高い方が、より赤く発色することがわかった。しかしながら、図 5.3 と 5.4、図 5.6 と 5.7 を比較してみるとあまり違いが見られなかった。これは塩化ナトリウム水溶液の濃度が飽和状態に近かったためと考えられる。

次に、フェノールフタレイン溶液の投入量による影響を考察した。図 5.2 と図 5.5 の変化の大きい 5V の場合を選んで比較したものを図 5.11 に示すが、発色の変化に大きな違いはみられなかった。他の条件で比較してもあまり変化の違いが見られなかったことから、フェノールフタレイン溶液の注入量による影響はないと考えられる。

次に、乳酸カルシウムと塩化ナトリウムのどちらが、低電圧で赤く発色しているかを考察した。写真からではわかりづらいが、どちらも 1V から発色していることが確認できた。しかしながら、いずれの場合も、1V では発色反応が悪く、どちらの物質を採用する場合でも、少なくとも 2V もしくは 3V の電圧が必要であり、濃度を調整しても可視化することは困難であるということが分かった。

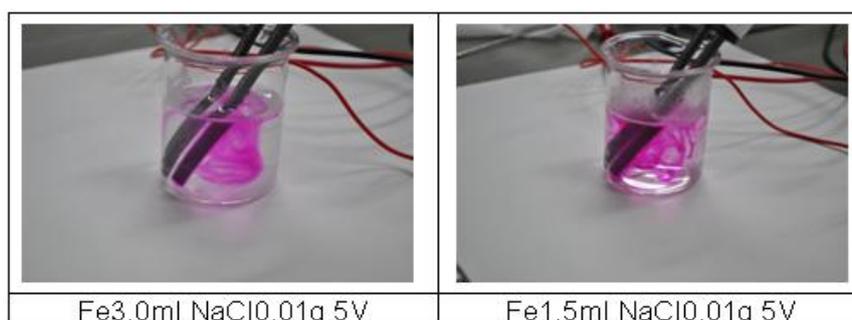


図 5.11 Fe の注入量による発色変化の比較

実験結果より濃度の高い方がフェノールフタレイン溶液は発色すると考えていたが、実際に発電装置を用いて発電して発色させたところ、電解溶液に炭素棒を入れた瞬間に電圧が低下して、実験結果に示すように 5V で見られた場合に比べて、発色しなかった。

その原因としては、昇圧回路の原理として電力を溜めて放出の動作を素早く繰り返すことにより、小さな電圧を昇圧するが、そのため出力電圧が不安定となり、乳酸カルシウムや塩化ナトリウムが大きな負荷となって、電圧低下を引き起こしているものと考えられる。このことから、電圧と濃度を高くすることで、発色の変化量も大きくできるが、昇圧回路を用いた場合、濃度を高くするにつれ、負荷が大きくなって電圧が低下し、発色性を良くする条件として矛盾が生じる。そこで、負荷を小さくし、電圧低下を抑えて濃度を高くするために、以下の実験を行った。実験装置を図 5.12 に示す。

5-3. 実験方法 2

- ① 電圧降下を防ぐために、塩化ナトリウム 0.01 g を 50ml の水に溶かし、フェノールフタレイン溶液を少量加え、濃度一定の条件化で、電解溶液を 10, 30, 50ml と変化させ、炭素棒を電解溶液中に入れる面積を小さくすることで、負荷を軽減できるかを調べる実験を行った。
- ② ①の実験を塩化ナトリウム 0.05、0.1 g として行い、濃度変化による電圧降下の違いを調べる実験を行った。
- ③ 乳酸カルシウムを用いて①、②の実験を行った。

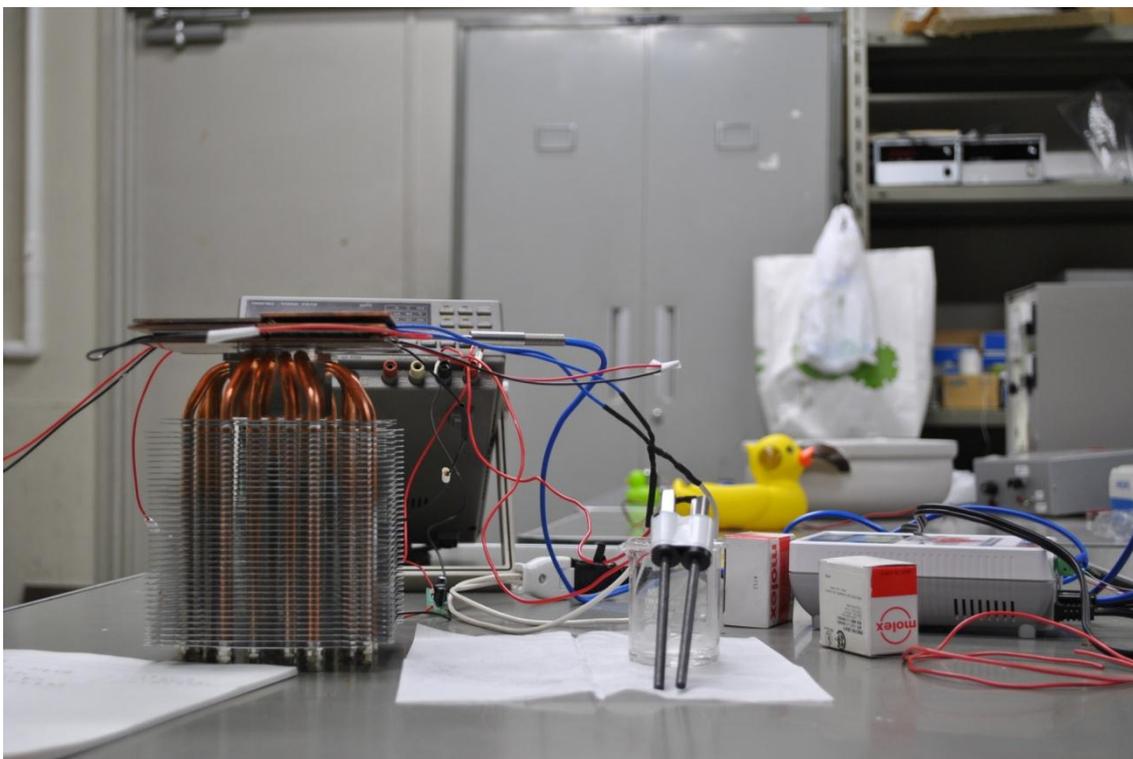


図 5.12 実験装置

5-4. 実験結果及び考察

表 5.1 NaCl 0.01[g]

NaCl 0.01[g]		
室温 T_0 [°C]	20.3	
水 [ml]	初期電圧 [V]	反応後電圧 [V]
10.0	4.98	4.10
30.0	4.98	2.90
50.0	4.98	2.00

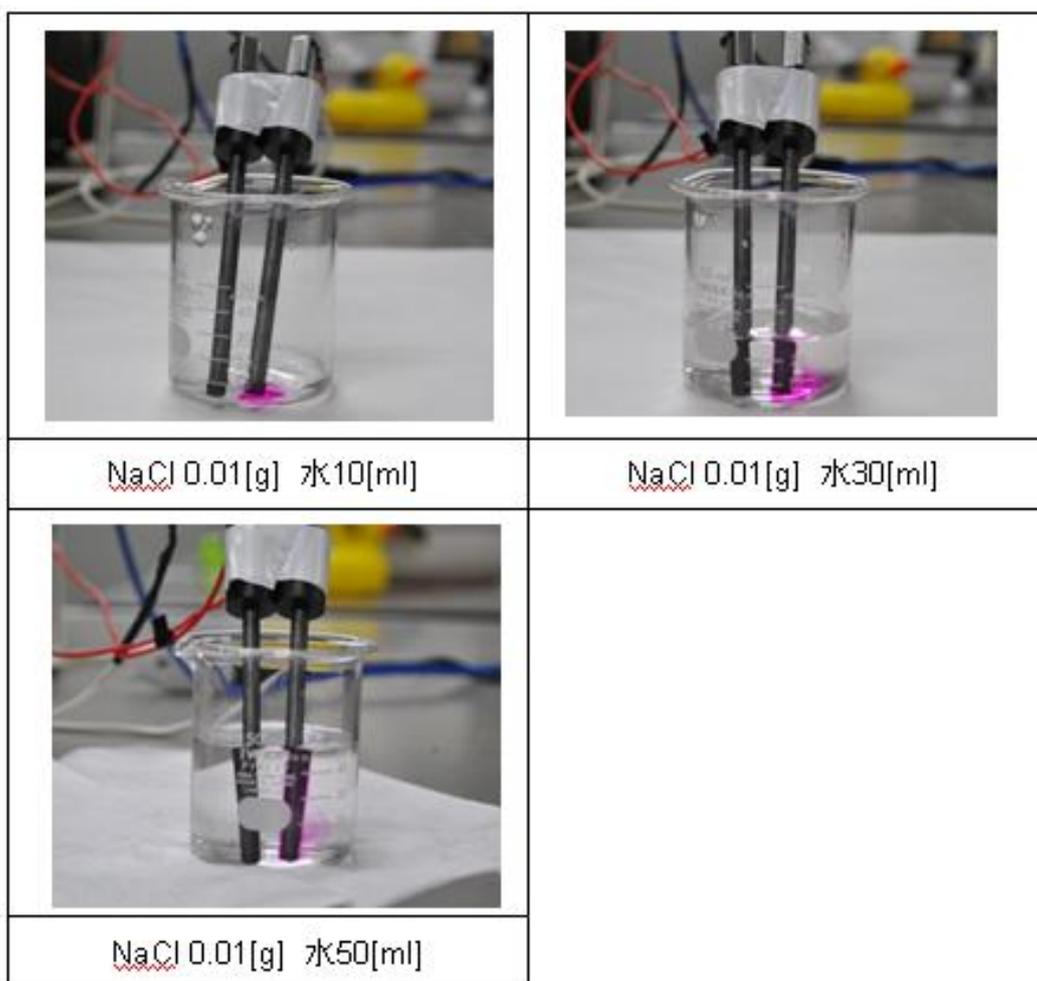


図 5.13 NaCl0.01 g での可視化結果

表 5.2 NaCl 0.05[g]

NaCl 0.1[g]		
室温 T_0 [°C]	22.1	
水 [ml]	初期電圧 [V]	反応後電圧 [V]
10.0	4.98	2.50
30.0	4.98	1.90
50.0	4.98	1.73

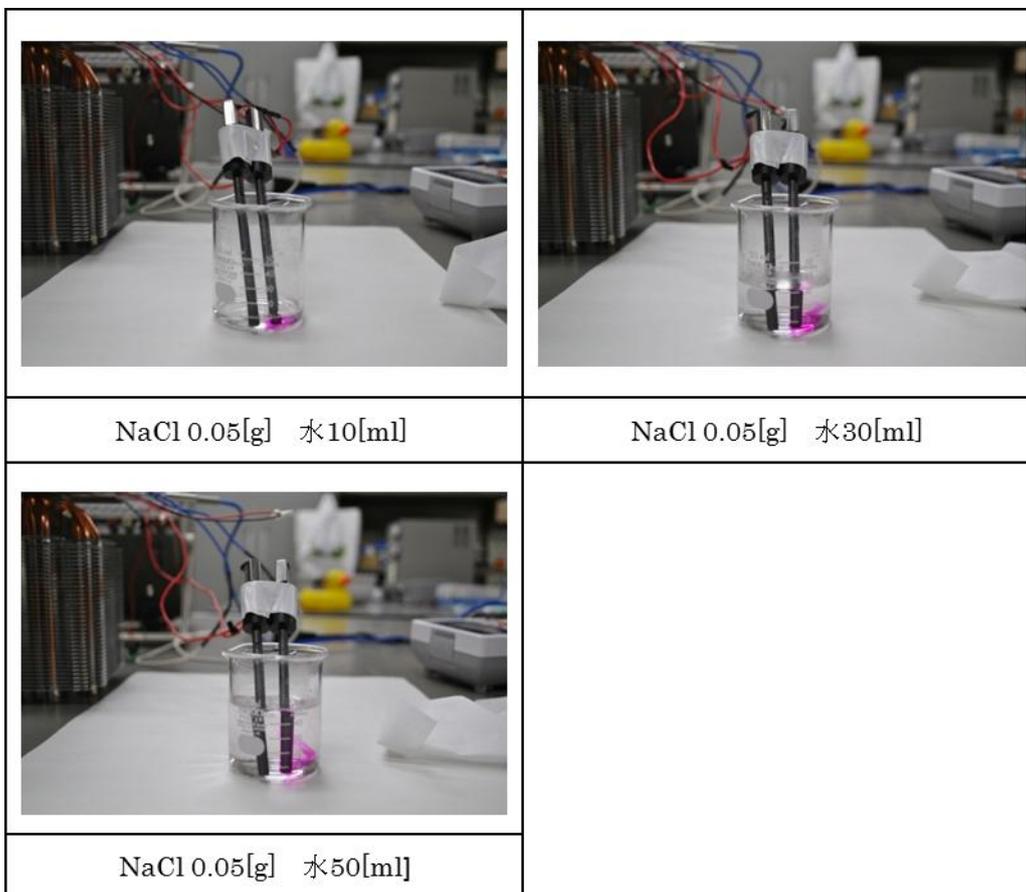


図 5.14 NaCl0.05 g での可視化結果

表 5.3 NaCl 0.1[g]

NaCl 0.05[g]		
室温 T_0 [°C]	21.7	
水 [ml]	初期電圧 [V]	反応後電圧 [V]
10.0	4.98	2.25
30.0	4.98	1.70
50.0	4.98	1.60

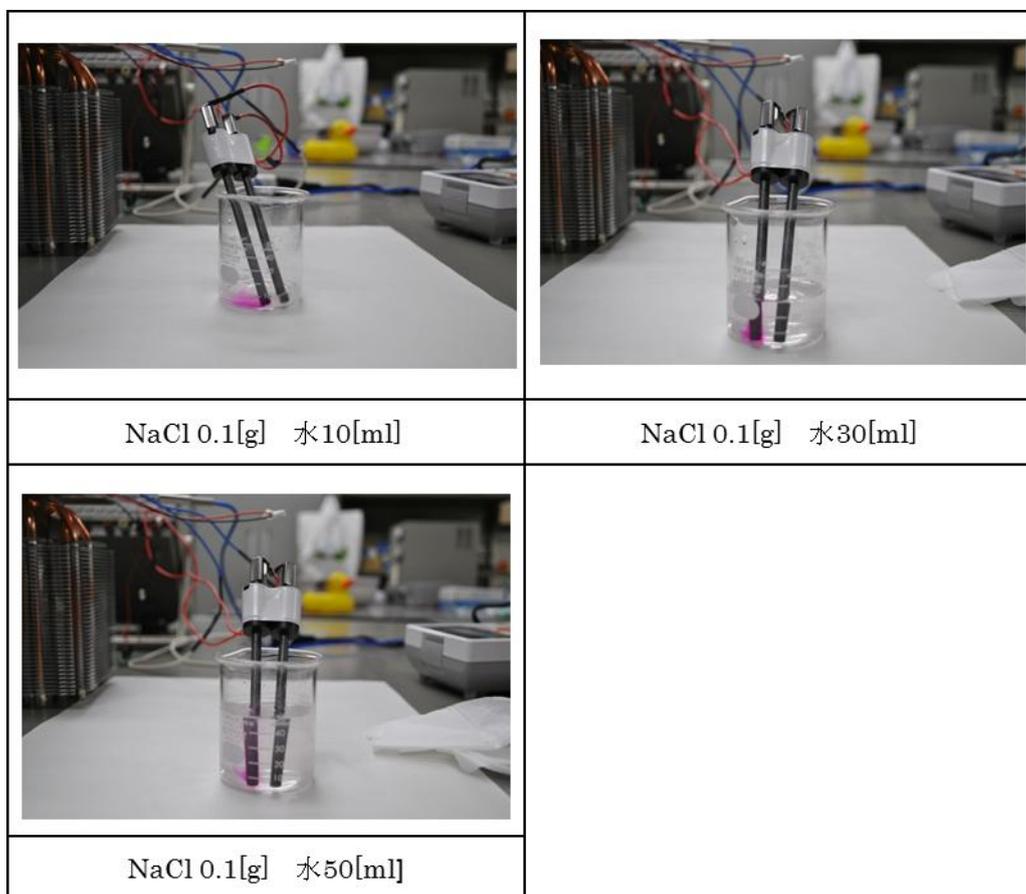


図 5.15 NaCl 0.1 g での可視化結果

表 5.4 $C_6H_{10}CaO_6$ 0.01[g]

$C_6H_{10}CaO_6$ 0.01[g]		
室温 T_0 [°C]	20.6	
水 [ml]	初期電圧 [V]	反応後電圧 [V]
10.0	4.98	3.45
30.0	4.98	2.90
50.0	4.98	2.50

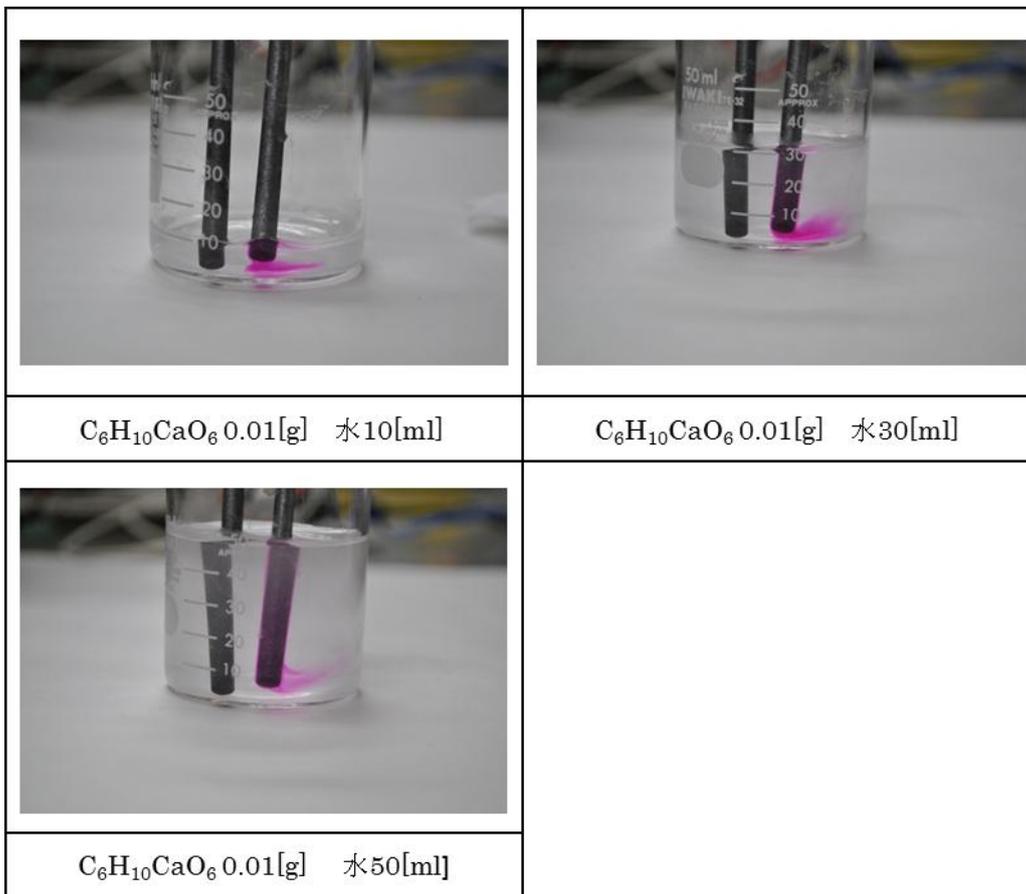


図 5.16 $C_6H_{10}CaO_6$ 0.01 g での可視化結果

表 5.5 $C_6H_{10}CaO_6$ 0.05[g]

$C_6H_{10}CaO_6$ 0.05[g]		
室温 T_0 [°C]	20.6	
水 [ml]	初期電圧 [V]	反応後電圧 [V]
10.0	4.98	3.95
30.0	4.98	2.30
50.0	4.98	2.08

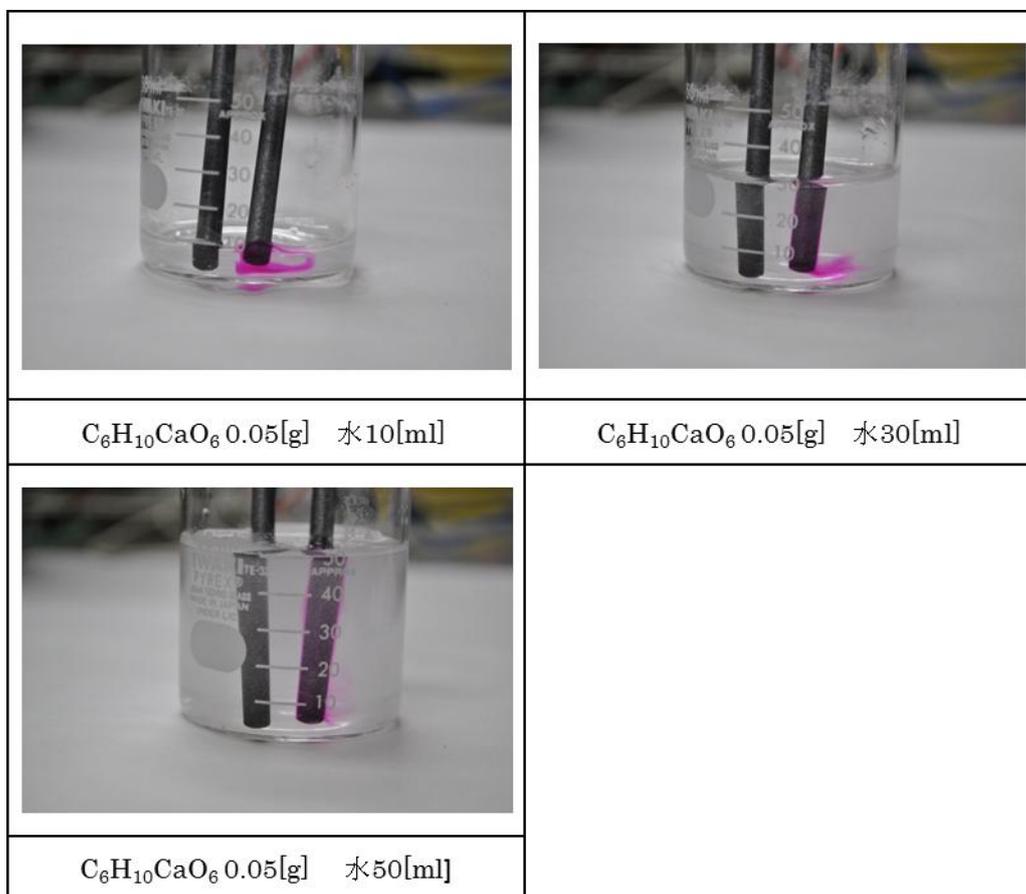


図 5.17 $C_6H_{10}CaO_6$ 0.05 g での可視化結果

表 5.6 $C_6H_{10}CaO_6$ 0.1[g]

$C_6H_{10}CaO_6$ 0.1[g]		
室温 T_0 [°C]	20.4	
水 [ml]	初期電圧 [V]	反応後電圧 [V]
10.0	4.98	3.70
30.0	4.98	2.29
50.0	4.98	2.03

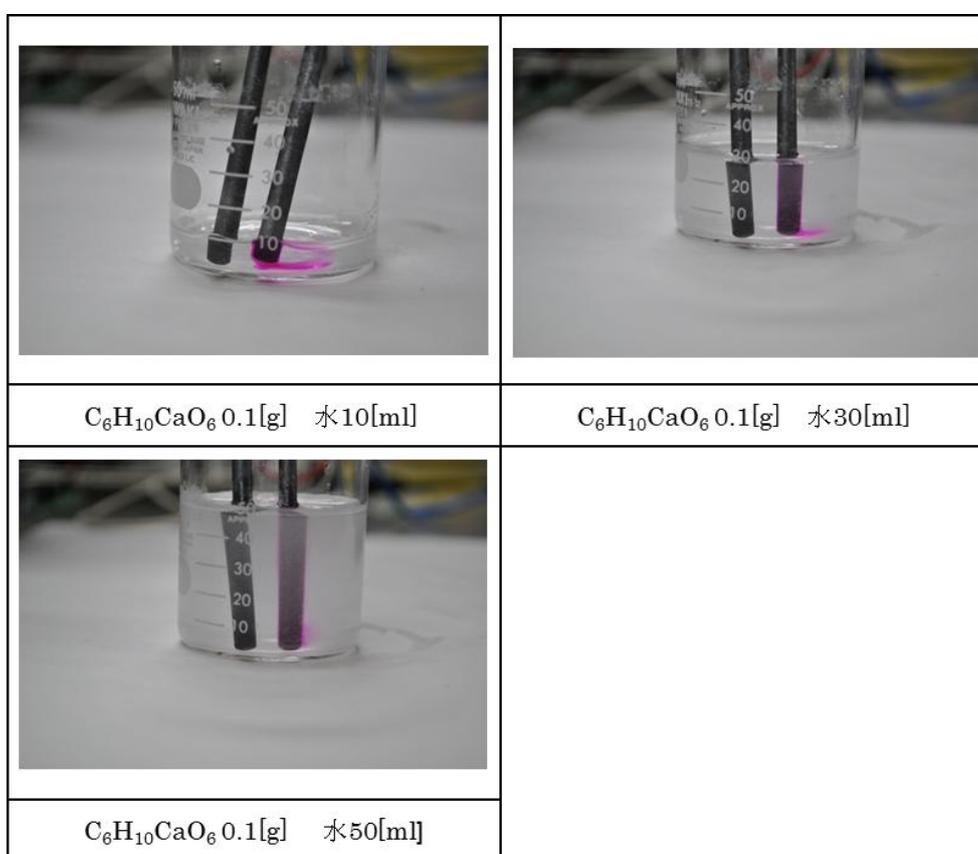


図 5.18 $C_6H_{10}CaO_6$ 0.1 g での可視化結果

炭素棒が電解溶液に触れる面積が小さい程、電圧降下が小さいことが分かった。また、塩化ナトリウムは、濃度が 0.02%以外の場合は著しい電圧降下が見られたが、乳酸カルシウムでは、塩化ナトリウムの場合ほど電圧降下が見られなかった。さらに、乳酸カルシウム水溶液の濃度が 0.02%の場合、電解溶液の量が増えた場合でも電圧降下が他と比べて小さいことから、おもちゃを製作する場合は、乳酸カルシウム水溶液の濃度は 0.02%が最適な濃度であると考えられる。

5-5. 電解棒の選定

これまで、電解棒として炭素棒を用いて実験を行ってきたが、電圧降下の影響を考慮するとアヒルのおもちゃの頬に可視化容器を取り付ける場合には、取り付け電解棒もなるべく面積の小さいものを使用する必要がある。そこで、銅線を電解棒とすることで、形状変化を容易にし、応用の幅を広げることができると考えた。図 5.19、図 5.20 に可視化実験に銅線を電解棒として使用した場合の応用例を示す。図 5.19 の渦巻き型よりも図 5.20 のコイル型の方が、集中して赤く発色しているのが分かる。例えば、アヒルのおもちゃの頬に可視化容器を取り付けて、発色を容易に認識できるようにするためには、電解棒をコイル形状にした方が良いと考えられる。

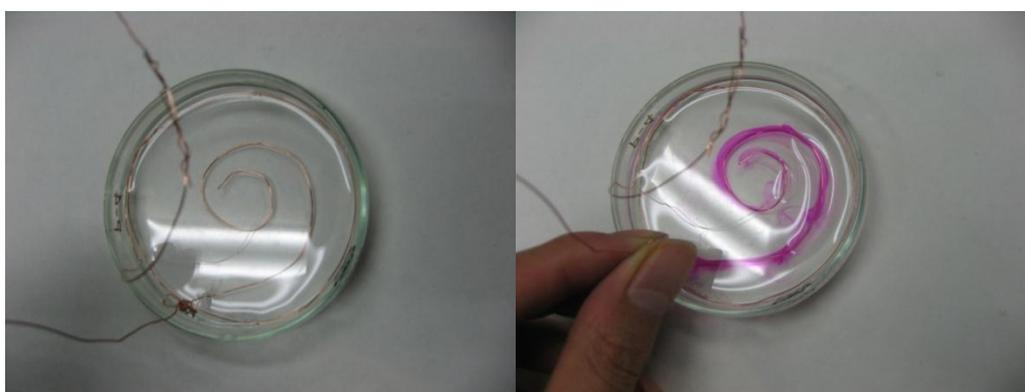


図 5.19 陰極部をうずまき形状にした場合の発色変化

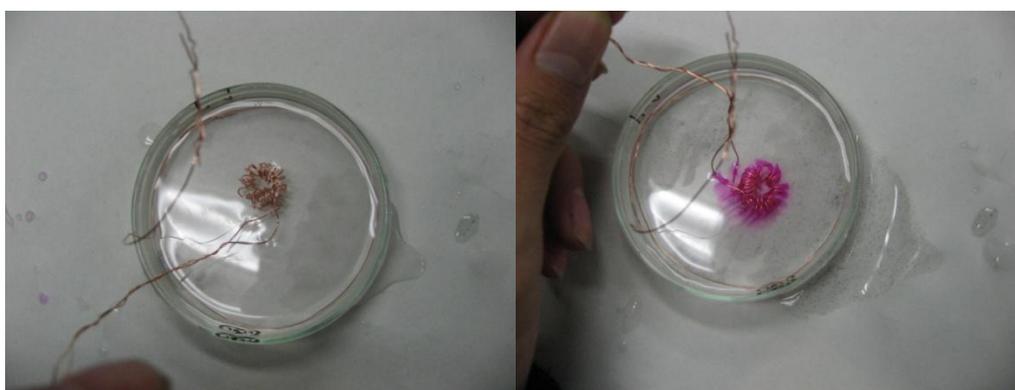


図 5.20 陰極部をコイル形状にした場合の発色変化

6. 40℃前後のお湯に対して赤色に発色する容器の製作

6-1. 温度差発電装置からの検討

40℃前後で赤く発色させるために、昇圧回路において一定電圧から急激に電圧が上昇するという性質を利用し、外気温度によって、ペルチェ素子の枚数を変え、発電効率を変化させて、適切な湯加減の時にのみ昇圧するように装置による電圧を調整する方法が考えられる。

図 6.1 はペルチェ素子が 1 枚、2 枚、3 枚、4 枚の場合にそれぞれ昇圧する際に必要な温度差と電圧との関係を示したものである。

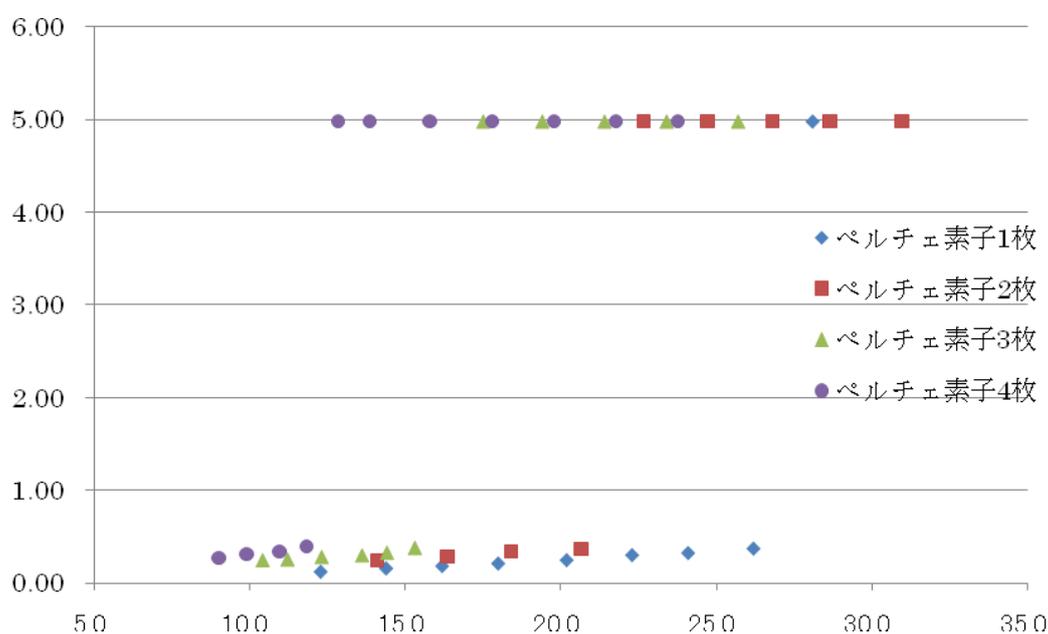


図 6.1 ペルチェ素子の枚数の変化による昇圧に必要な温度差

図 6.1 から湯温と室温との温度差と昇圧に必要な温度差の関係について検討した。ペルチェ素子が 4 枚の場合は、温度差が約 13℃の場合に昇圧を開始していることが分かる。このことから温度差が 12℃以下の場合には昇圧しないので外気温度が 23℃以上であるとすると、4 枚のペルチェ素子を用いた場合の実験では、湯温が 35℃以下なら発色反応が起こらず、35℃以上の場合には発色反応が生じるということが分かる。このため、逆に外気温度が高すぎると昇圧するために必要な温度差が得られず、発色反応が起こらない。例えば、42℃を適温とする場合には、外気温度が 29℃以下の場合にのみ使用できることになる。

同様にペルチェ素子が 1 枚、2 枚、3 枚の場合でも 36～42℃の時に反応する外気温度の関係を計算し、それらを表 6.1 にまとめた。

表 6.1 36～42℃の場合にだけ発色させるペルチェ素子と外気温の関係

	昇圧に必要な温度差(°C)	最低外気温(°C)	最高外気温(°C)
ペルチェ素子 4 枚	13°C	23°C	29°C
ペルチェ素子 3 枚	17.5°C	18.5°C	24.5°C
ペルチェ素子 2 枚	21.3°C	14.7°C	20.7°C
ペルチェ素子 1 枚	27.1°C	8.9°C	14.9°C

表 6.1 を参考にして、季節の変わり目において外気温が大きく変動する場合には、ペルチェ素子の枚数を変化させることにより、適切な湯温の場合にのみ発色させることができるものと考えられる。

6-2. 可視化装置からの検討

6-1 章ではペルチェ素子の枚数を変えることでほとんどの外気の温度変化をカバーできる可能性があるけれども、ペルチェ素子の枚数を固定する場合について検討した。

5 章では実験結果から、電気分解させる電解棒が電解溶液に触れる面積が小さいほど、電圧降下の影響を受けずに高い電圧を維持できるので、より濃い赤色に発色させることができることが分かった。次に、この結果を利用し、電解棒の面積を大きくすることにより、電圧降下を大きくして、発色変化を鈍らせることで、35°C付近では変化せず、40°C付近で変化させることができるのではないかと考えた。

アヒルの頬に装着できる容器として、コンタクト保存容器と、パッチンというおもちゃ 2 つを接合した容器の 2 種類の可視化容器を製作した。図 6.2 では、陰極部に銅線を小さなコイル状にしたものを使用した。コイル状にすることで、電解液との接触面積を小さくし、降下電圧の影響を小さくすることで発色性が良くなると考えられる。

図 6.3 では、陰極部を図 6.2 のコイルより大きなコイル状にすることで、電解液との接触面積を大きくし、降下電圧の影響を大きくすることにより、発色性を鈍らせることができると考えられる。



図 6.2 可視化容器試作 1

図 6.3 可視化容器試作 2

温度差を十分に確保して昇圧させるために、外気温が 15℃の時に 4 枚のペルチェ素子を用い、35℃のお湯の場合と、40℃のお湯の場合で、変化の違いがあるか実験を行った。

試作可視化容器 1 では図 6.4、6.5 のようになった。35℃の場合も、40℃の場合もすぐに発色し始め、濃い赤色を示し発色性がよくなっていることが確認できた。

試作可視化容器 2 では図 6.6、6.7 のようになった。35℃の場合と 40℃の場合を比べると、40℃の場合の方がよく発色していることが分かる。また、容器が黄色のため、発色すると綺麗な赤色に発色することが確認できた。

この結果から、昇圧による発色制御ができない条件下の場合は、電解棒の面積を変化させていくことで対応可能であると考えられる。

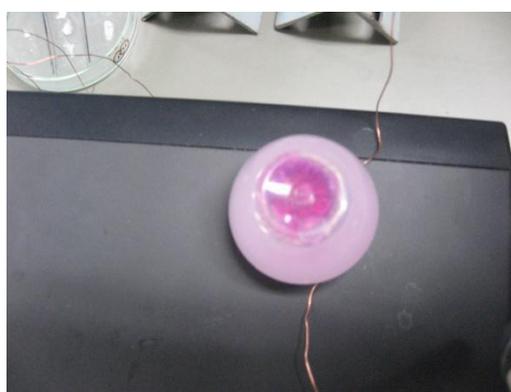


図 6.4 湯温が 40℃の場合



図 6.5 湯温が 35℃の場合



図 6.6 湯温が 40℃の場合

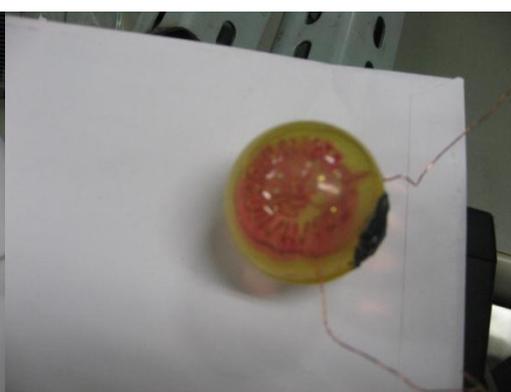


図 6.7 湯温が 35℃の場合

7. アヒルのおもちゃの製作

7-1. 発電した電気でアヒルの頬が赤く発色する装置の製作

今回は、ペルチェ素子 4 枚の場合で適切な湯温の場合にアヒルの頬を赤くするおもちゃを製作した。頬部分には、6.2 章で試作した試作可視化容器 1 と試作可視化容器 2 を両頬に取り付け、2 つの容器の配線をアヒルの内部で並列に接続した。図 7.3 がアヒルの頬で電気を可視化できる装置の完成図である。

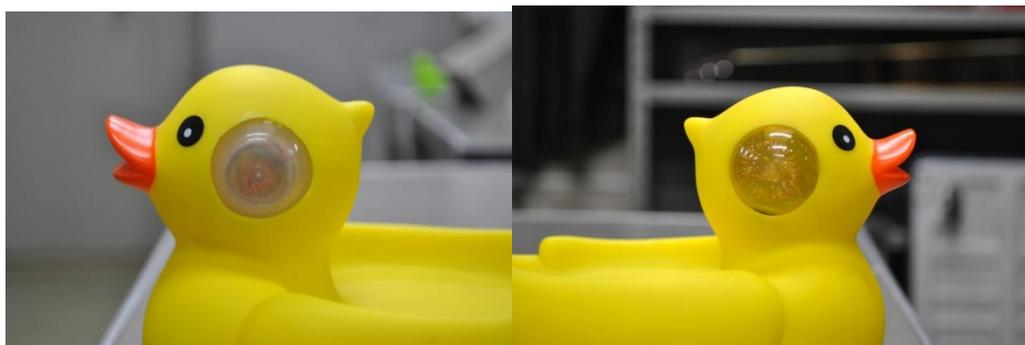


図 7.1 左頬

図 7.2 右頬

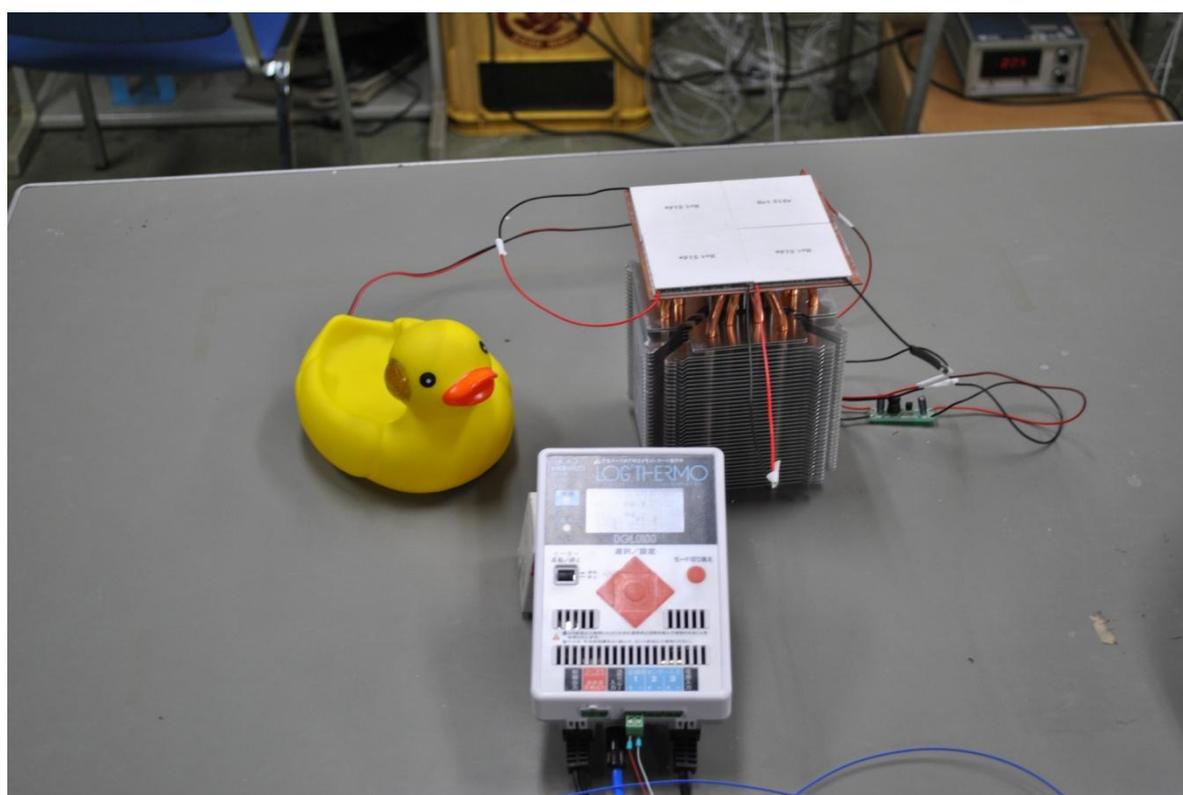


図 7.3 アヒルの頬で電気を可視化する装置の完成図

7-2. 可視化実験結果

図7.3の可視化装置を用いて、いい湯温とされる40℃の場合とぬるい湯温として35℃の場合について、昇圧を制御することができる外気が23℃以上の場合に実験を行った。以下に外気温度が23.1℃の場合の5分後の様子について示す。

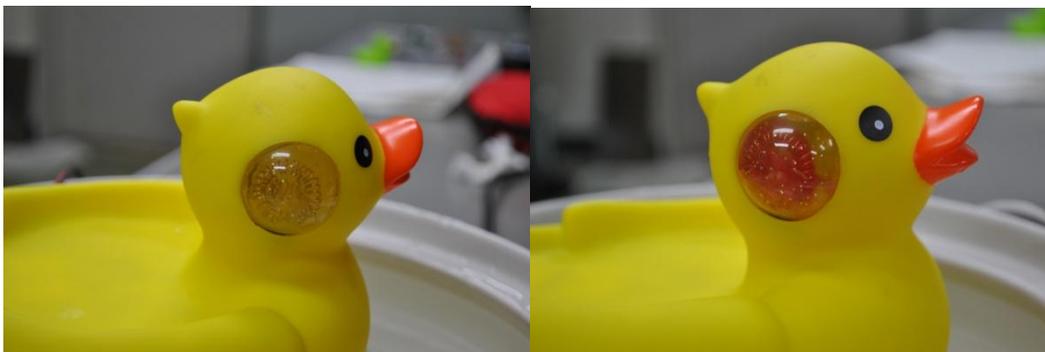


図 7.4 湯温が 35℃の場合の右頬

図 7.5 湯温が 40℃の場合の右頬①



図 7.6 離れてみた様子②

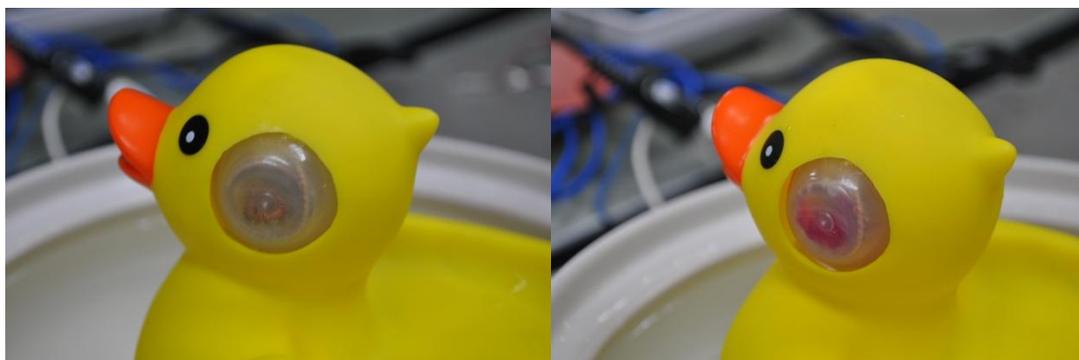


図 7.7 湯温が 35℃の場合の左頬

図 7.8 湯温が 40℃の場合の左頬①



図 7.9 湯温が 40°C の場合の左頬②

図 7.4 と図 7.7 から、湯温が 35°C の場合は全く発色されていないことが確認できた。このことから、湯温が 35°C の場合は、昇圧回路が作動しなかったと考えられる。

一方、図 7.5 と図 7.8 から、赤く発色していることが確認できた。このことから、湯温が 40°C の場合は、昇圧回路が作動し、発色したものと考えられる。

以上の実験結果から、微小温度差発電装置に昇圧回路を組み込むことで、赤色に発色させるための温度制御が可能であることが分かった。

今回の可視化実験を動画にまとめたものを次のファイルにまとめた。湯温が 40°C の場合の可視化実験の動画をファイル名「40°C の場合の可視化実験」に、湯温が 35°C の場合の可視化実験の動画をファイル名「35°C の場合の可視化実験」にまとめたので、ご覧頂きたい。

8. まとめ

微小温度差発電装置を用いたお風呂の湯を用いた可視化の実験を行い、以下の知見を得ることができた。

目標(1)：お風呂のお湯を使った温度差発電装置を製作する。

ペルチェ素子とヒートパイプ搭載型のヒートシンクとを組み合わせることでペルチェ素子単体よりも発電効率を高くできることが分かった。また、昇圧回路と発電装置とを組み合わせることで、湯温の可視化に必要な電圧を確保することができた。

目標(2)：電圧とフェノールフタレイン溶液の発色パターンとの定量的な関係を求める。

フェノールフタレイン溶液の電気分解による発色は、フェノールフタレイン溶液自体の濃度にはあまり依存せず、電解溶液に用いる塩化ナトリウム水溶液、乳酸カルシウム

水溶液の濃度によって、赤く発色させるために必要な電圧が変化することが分かった。また、最低でも2V程度の電圧を確保しなければ、濃度を変化させても発色を確認することができなかった。さらに、低電圧で昇圧した場合、電解溶液が負荷となり電圧降下が生じることが分かった。電圧降下を防ぐために、電解溶液と反応させる電解棒の面積を小さくすることで、降下電圧の下がり幅を減少させることが分かった。

目標(3)：フェノールフタレイン溶液と温度差発電装置を組み合わせ、お風呂の湯温が約40℃になると赤くなる容器を試作する。

電解棒として銅線を用いることで電解溶液との接触面積を調整し、電圧降下を防ぎ発色性の良い容器を試作した。また、40℃程度になると赤く発色させるために、一定の電圧に達しなければ電圧が上昇しないという昇圧回路の特性を活かし、外気の温度変化に対応してペルチェ素子の枚数を変えることで電圧を制御し、ある一定の温度以下では発色せず、40℃程度になると赤く発色するシステムを構築した。

目標(4)：アヒルの頬部に容器を組み込んで、お風呂に浮かべることができるおもちゃを製作する。

目標(3)で試作した容器をアヒルの頬部分に装着し、微小温度差発電装置と組み合わせることで、湯温が約40℃になるとアヒルの頬が赤くなる可視化装置を製作した。今回の可視化実験では、4枚のペルチェ素子を用いて、湯温が35℃では変化せず40℃になると赤く発色することを確認した。

今後の展開として、今回はペルチェ素子の枚数によって、温度差により昇圧回路を制御したが、昇圧回路とは別に一定の電圧になれば、スイッチがオンとなり、一定の電圧以上になれば、スイッチがオフとなるスイッチング回路を製作することでペルチェ素子の枚数を変化させずに昇圧制御ができると考えている。この方がペルチェ素子の枚数を変える必要がないけれども、外気温が変化することで電圧が変化するため、電圧変化に対応するスイッチング回路の製作に工夫が必要である。

また、低電圧で昇圧回路を作動させていたために、電圧降下が起こり、可視化させることに苦勞したことから、昇圧回路が安定に電圧を出力できる1.5V程度を目標値として微小温度差発電装置の改良が必要である。

謝辞

本実験の実施にあたり、株式会社八光電機製作所様より実験費、実験器具の助成を頂いたこと、及び「熱の実験コンテスト」という貴重な発表の場を設けて頂いたことについて深く感謝の意を表します。

また、本実験の計画及び実施にあたり、丁寧かつ熱心なご指導をして下さった武田哲明教授、鳥山孝司准教授、舩谷俊平助教には、深く感謝します。さらに、実験の実施に関し、ご指摘かつご協力頂いた武田研究室の皆様へ感謝致します。