

発酵熱で（LED を 8 個）発光させる！？

所属：大島商船高等専門学校 商船学科 山口研究室

代表者名：後河内淳司、鴨瀬拓海、北野由崇、桑田晃弘、萩本竜成

金森一樹、小嶋祐資、福喜慧悟

1. はじめに

私たちの研究室では里山の荒廃の整備と竹の有効活用を目的に地元企業と協力して竹林整備のボランティアを行ってきた。その際、竹林の中に入ると冬にもかかわらず少し地面が温かいと感じた。不思議に思い帰って調べてみると、竹の葉などが地上に堆積し、それが発酵して熱を生み出していることがわかった。竹以外にも米ぬかや落ち葉、生ごみなど私たちの身の回りの材料で発酵熱が発生することがわかった。この発酵熱をエネルギーとして有効利用出来ないかと考え本実験を提案した。発酵熱の利用の多くが大規模なものであるが、できるだけ小規模で効率的な発酵熱の発生および、そこから発電して LED を 8 個発光させることを目標に、発酵熱による発電システムの構築を行う。尚、LED の数を 8 個としているが、これに理論的な意味はない。当初、スターリングエンジンを利用した発電システムを想定していた。そのときのイメージを図 1 に示す。

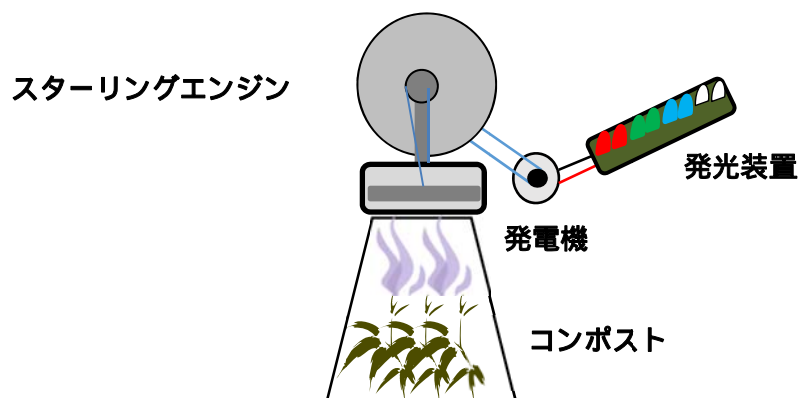


図 1 当初の発酵熱発電システムのイメージ

2. 実験概要と班別目標

本実験では最終目標である発酵熱で LED を 8 個、発光させるために、以下の 3 つの班に分かれて実験を進めた。

発酵熱班（メンバー：北野、金森）

目標：高い温度で発酵する配合を見つける。

発電班（メンバー：萩本、鴨瀬）

目標：発酵熱から効率よく発電できるシステムを作製する。

LED 発光班（メンバー：桑田、福喜）

目標：低電圧において LED を 8 個点灯させる。また、発酵熱の温度および発電量によって順次 LED が点灯していく装置を作製し、どれだけ発電できているか可視化できるようにする。

調整役として後河内、小嶋が担当した。メンバーは主に担当の実験を行ったが、他の班の実験も気になるのか、多くの人間が参加して実験を行った。

3. 実験内容

発酵熱に関する実験、発電システムの作製、発光装置の作製、発酵熱による発電システムの作製それぞれについて説明していく。

3 - 1. 発酵熱の発生実験

できるだけ高い温度の発酵熱を発生させるため、様々な配合の堆肥を作製して検証を行った。

(1) 発酵熱に関する用語

ここでは本実験で用いた、発酵および関係する用語について簡単に解説する。

発酵

発酵とは、狭義には、酵母菌（イースト菌・乳酸菌）などの微生物が嫌気条件下でエネルギーを得るために有機化合物を酸化して、アルコール、有機酸、二酸化炭素などを生成する過程をいう。広義には、微生物を利用して、食品を製造することや、有機化合物を工業的に製造することをいう。

発酵熱

発酵熱とは微生物が発酵というかたちの生命活動によって発生する熱をいう。

好気発酵

好気発酵とは微生物が活動するために空気（酸素）を必要とする発酵をいう。

嫌気発酵

嫌気発酵とは空気（酸素）を必要としない微生物による発酵をいう。

堆肥

堆肥とは、有機物が微生物によって完全に分解した肥料を指す。ただし、本実験ではこれから堆肥にしようとする有機材料についても堆肥と表現している。

コンポスト

コンポストとは本来堆肥のことであるが、堆肥を作製するための容器についても指す。本実験では後者の容器について指す。

はんぺん

はんぺんとは発酵に必要な微生物（菌）のかたまりをいい、白くてふわふわとした固まりであることからこのように呼ばれている。はんぺんの写真を図 2 に示す。



図2 はんぺん（白カビ）の発生（中身は米ぬかをベースにしたもの）

(2) 発酵熱の確認実験

8月までの前期では実際に米ぬかや竹チップが発酵する過程でどのように発熱をするのか確認実験を行った。米ぬかは近くの無人精米機から分けてもらった。また、竹チップは地元のNPO法人から分けてもらった。竹チップは山に野積みされており、すでに発酵がはじまっていて暖かくなっていた。本実験では20[L]の大きさのポリ容器をコンポストとして用いた。配合等は堆肥作りを参考にNo.1からNo.4の配合として発酵熱の実験をはじめた。水分は40[%]から60[%]程度と言われているが、一般的に材料を団子状にして崩れない程度でよいとされていたため、これを参考にした。また、発酵方法は嫌気発酵を採用した。配合について表1に示す。米ぬかには発酵に必要な微生物である菌類がないため腐葉土を足した。7月16日から23日までの8日間について温度の計測を行った。この結果について図5にまとめる。



図3 実験状況



図4 竹チップによる発酵

表1 確認実験の配合

No.	配合 および 作業内容	発酵状態
1	竹チップ 5kg	嫌気発酵
2	竹チップ 5kg、米ぬか 1kg	嫌気発酵
3	竹チップ 5kg、鶏糞 2kg	嫌気発酵
4	米ぬか 4kg、鶏糞 1kg、腐葉土3kg	嫌気発酵

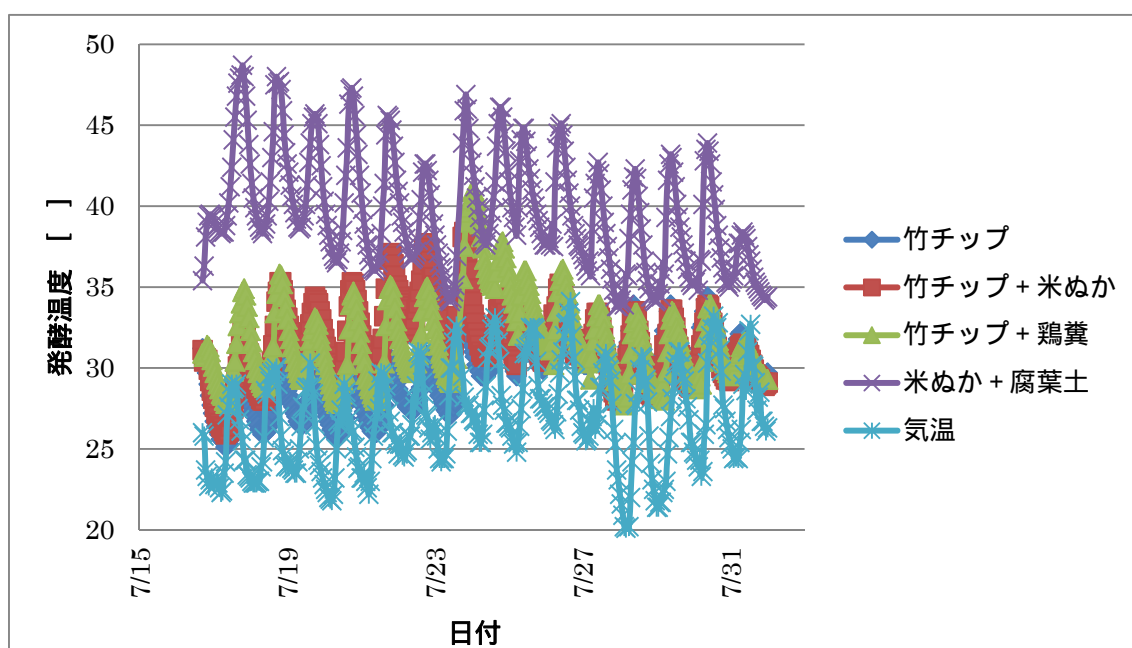


図5 確認実験における温度変化

本実験結果より No4 の米ぬかを主体としたものが一番有効であった。最大で 48[°C]まで達し、発酵による発熱を確認することができた。また、気温の高い時間に菌類の活動が活発となって発熱が大きくなることから、外気温に大きく影響されることが分かった。また、No4 は腐葉土にいる菌類が活躍してくれたと考えられる。竹チップによる発酵が悪かったのは 3 か月ほど野積みされていたものを使用したため、すでに熟成されていたからだと考えられる。

(3) 発酵熱の回収を目的とした堆肥配合の検証実験

10 月以降の後期では、前期の実験結果を踏まえて、効率的により大きな発熱量を発生することができる配合を見つけるための実験を行った。作業内容および配合についてコンポストごとに表 2～表 5 に、またその配合における温度の変化について図 6 に示す。また、外気温の影響や雨水の侵入を防止するため室内に移動して実験を再開した。

表2 コンポスト No.1 の作業内容及び配合

No1		
作業日	作業内容および配合	発酵方法
10月17日	新規作製(配合1-1) 米ぬか2kg鶏糞1kg腐葉土1.5kg	嫌気発酵
10月21日	切り返し作業(かき混ぜ&水)・はんぺん確認	好気発酵
10月23日	切り返し作業(かき混ぜのみ)	好気発酵
10月27日	切り返し作業(かき混ぜ&水)	好気発酵
11月6日	新規作製(配合1-2) 米ぬか1.5kg腐葉土2kg竹チップ1kg	嫌気発酵
11月13日	切り返し作業(かき混ぜ&水)・はんぺん確認	好気発酵
11月21日	切り返し作業(かき混ぜ&水)	好気発酵

表3 コンポスト No.2 の作業内容及び配合

No2		
作業日	作業内容および配合	発酵状態
10月17日	新規作製(配合2-1) 米ぬか2kg腐葉土1.5kg EM菌0.6kg骨粉&油粕1kg	嫌気発酵
10月21日	切り返し作業(かき混ぜのみ)	好気発酵
10月23日	新規作製(配合4-1-2) 米ぬか1.5kg腐葉土1kg 骨粉&油粕1kg鶏糞1kg	嫌気発酵
10月28日	切り返し作業(かき混ぜ&水)・はんぺん確認	好気発酵
11月4日	切り返し作業(かき混ぜ&水)	好気発酵
11月11日	新規作製(配合4-1-3) 米ぬか1.5kg腐葉土1kg骨粉&油粕1kg	嫌気発酵
11月18日	切り返し作業(かき混ぜ&水)・はんぺん確認	好気発酵
11月20日	新規作製(配合2-2) 米ぬか1.5kg竹チップ1.5kg 腐葉土0.8kg鶏糞1kg	嫌気発酵

表 4 コンポスト No.3 の作業内容および配合

No3		
作業日	作業内容および配合	発酵方法
10 月 17 日	新規作製(配合 3-1) 米ぬか1.5kg腐葉土1kg骨粉&油粕1kg	嫌気発酵
10 月 21 日	切り返し作業(かき混ぜのみ)・はんぺん確認	好気発酵
10 月 23 日	切り返し作業(かき混ぜのみ)	好気発酵
10 月 26 日	切り返し作業(かき混ぜ&水)	好気発酵
10 月 28 日	切り返し作業(かき混ぜ&水)	好気発酵
11 月 6 日	今入っているものに追加(かき混ぜ&水)	好気発酵
11 月 11 日	切り返し作業(かき混ぜ&水)	好気発酵
11 月 14 日	切り返し作業(かき混ぜ&水)	好気発酵

表 5 コンポスト No.4 の作業内容および配合

No4		
作業日	作業内容および配合	発酵方法
10 月 17 日	新規作製(配合 4-1-1) 米ぬか1.5kg腐葉土1kg 骨粉&油粕1kg鶏糞1kg	嫌気発酵
10 月 21 日	切り返し作業(かき混ぜ&水)・はんぺん確認	好気発酵
10 月 23 日	切り返し作業(かき混ぜのみ)	好気発酵
10 月 26 日	切り返し作業(かき混ぜ&水)	好気発酵
10 月 28 日	かき混ぜのみ	好気発酵
11 月 6 日	新規作製(配合 4-2) 米ぬか1kg腐葉土2kg竹チップ1.5kg 骨粉&油粕0.5kg鶏糞0.3kg	嫌気発酵
11 月 14 日	切り返し作業(かき混ぜ&水)・はんぺん確認	好気発酵
11 月 20 日	切り返し作業(かき混ぜ&水)	好気発酵

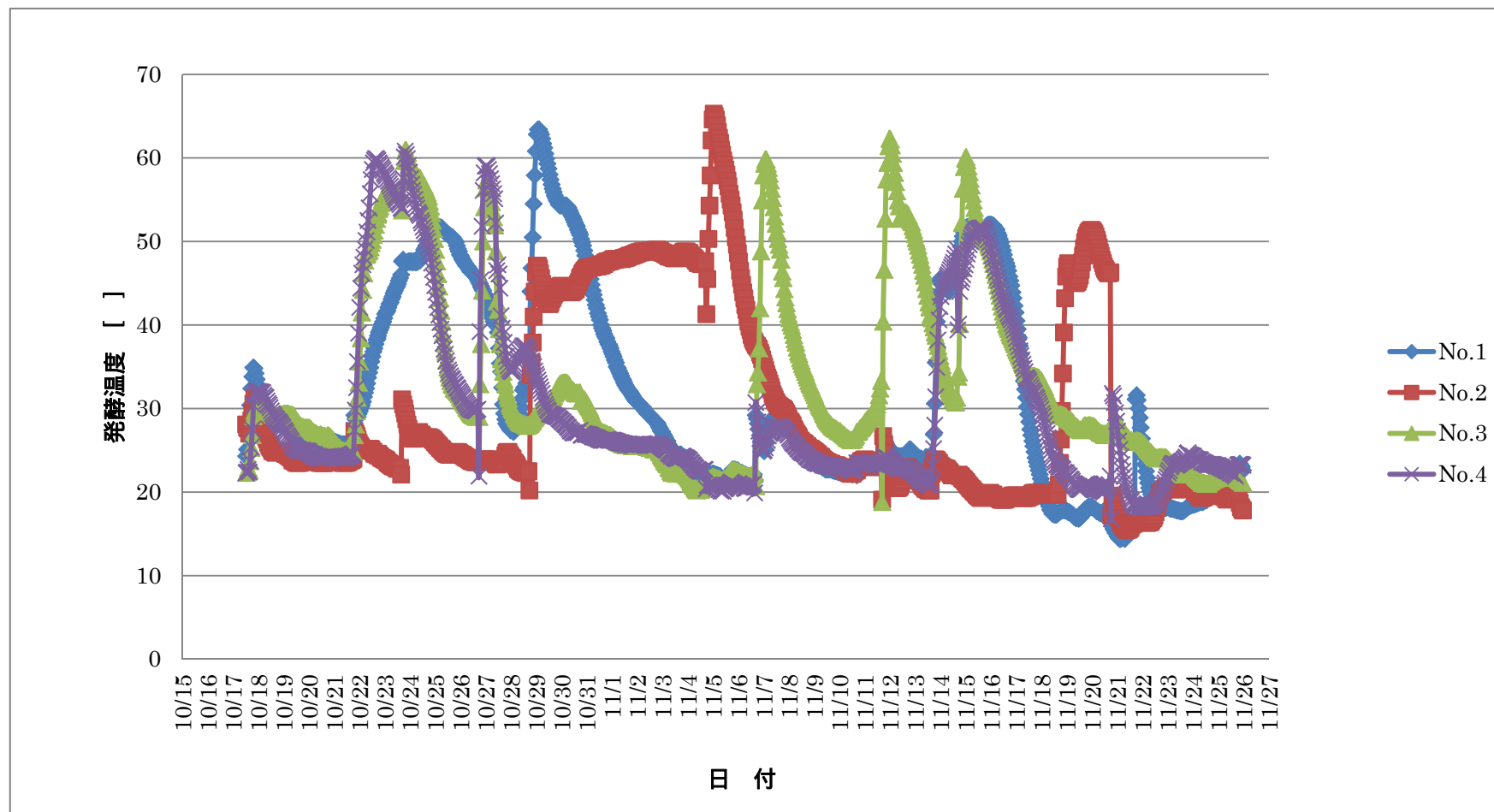


図6 検証実験における温度変化

本実験結果より、最高温度は 64.6[] に達することができたが、長時間持続して発酵熱の発生できる温度は 48[] 程度であった。前期までの実験では嫌気発酵が効果的であると考え、ふたをして実験を行っていた。後期に入っても嫌気発酵をおこなったが、室内に入れたため外気温の影響がなくなり発酵熱の発生は 1 日で終わってしまった。試しに配合をそのままにして好気発酵を行った。その後、いずれのコンポストでも 60[] 前後の発酵熱が確認できた。このことから、嫌気発酵によりはんぺんを作製し、その後攪拌して好気発酵をおこなうと効率よく発酵熱を発生できることが分かった。また、骨粉と油粕などが発酵熱の上昇に効果的であることが分かった。本実験により発熱量の大きい配合は 10 月 23 日に No.2 コンポストで作製した配合 4 - 1 - 2 (米ぬか 1.5[kg]、腐葉土 1[kg]、骨粉 & 油粕 1[kg]、鶏糞 1[kg]) が有効であった。しかし、同じ配合であっても、発酵が続くものと続かないものがあったが、その違いについて確認することができなかった。また、No.3 コンポストで作製した配合 3 - 1 (米ぬか 1.5[kg]、腐葉土 1[kg]、骨粉 & 油粕 1[kg]) について、適宜攪拌が必要なものの安定した発酵熱の発生を確認できた。配合 4 - 1 - 2 も、配合 3 - 1 もベースが、米ぬか、腐葉土、骨粉 & 油粕ということで、この配合が効果的であることが分かった。この配合を参考にして発電システムの作製を行った。

3 - 2. 発電システムの作製

本実験の申請段階ではスターリングエンジンを使用して発電を行うことを想定していたがトルクが小さく、発酵熱から得られる熱量では回転数も得られないためペルチェ素子を用いた発電システムとした。また、堆肥内の発酵温度が高温であっても発電システムを設置する表面の温度は下がっており、効率よく伝熱させる方法についても検証を行った。

(1) スターリングエンジンを使った実験

本実験で使用したスターリングエンジンは手のひらに載せて体温と外気温との差でも回転できるものである。実際に調べたところ 10[] 差程度で回転し始めることを確認した。スターリングエンジンのフライホイール部に合わせた歯車を作製して大歯車とし、市販の風力発電キットに子歯車を設置し、ヒーターを用いて点灯時実験を行ったところ、温度差 40[] でようやく点滅し始めた。発酵熱による実験により温度差を 40[] を得られる時間はごくわずかであり、発酵熱から得られる実用的な温度差が 28 度程度であることから、発酵熱による発電システムへのスターリングエンジンの利用は不向きであった。なお、発酵熱によって温度差を 28[] 程度与えた場合 25[rpm] 程度の低回転数で回転をした。

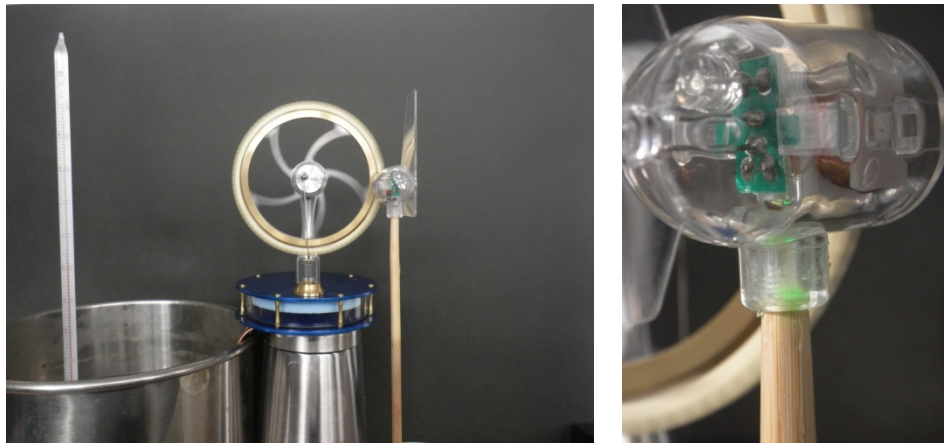


図7 スターリングエンジンによる発電（40[]の温度差でかろうじて点滅し始めた）



図8 コンポスト上のスターリングエンジン

(2) ペルチェ素子を使った実験

ペルチェ素子とは 2 種類の異なる金属をつないで直流電流を流すとその接続部において熱の発生および、反対側で熱の吸収が起こり、温度差が生じる。この現象をペルチェ効果という。この現象の反対にペルチェ素子の両面に温度差を与えると、起電力を得ることができる。この効果をゼーバック効果という。ペルチェ素子の原理を図 9 に、本実験で使用したペルチェ素子を図 10 に示す。

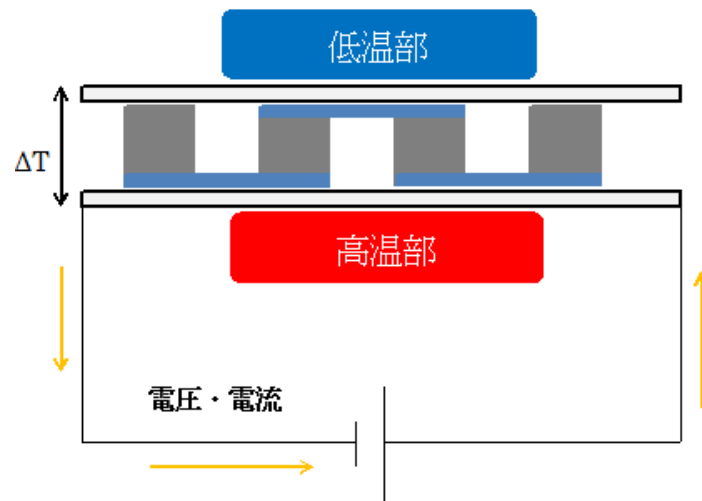
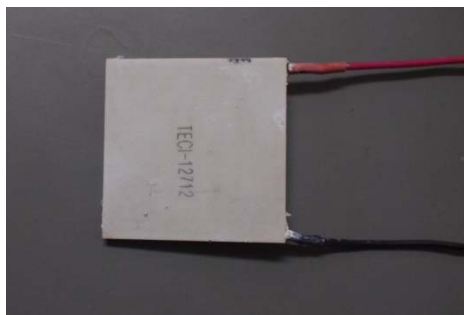


図9 ペルチェ素子の原理



名称	TEC1-12712
サイズ	40×40×3.1[mm]
最大温度差	68[]
最大電流	12A
最大電圧	15.4V
使用可能温度範囲	-60 ~ 90[]

図10 本実験で使用したペルチェ素子

本実験ではペルチェ素子のゼーベック効果を用いて起電力を調べた。発酵熱の温度が最大 60 程度、外気温が 20[] 程度、温度差が最大 40[] 程度と想定して実験をおこなった。後述するヒートパイプとペルチェ素子を組み合わせた発電装置を作製し実験を行った。この実験装置について図 11 に示す。ペルチェ素子は 40[mm] × 40[mm] で 12[A] のものを 2 つ直列につないだ。高熱側は電熱式のヒーターを用いて水温を調整できるようにし、この熱はヒートパイプを用いてペルチェ素子まで伝熱させている。低熱源側はヒートシンクを用いて放熱した。この実験装置を用いて温度差と起電力の関係について調べた。この結果を図 12 に示す。また、LED の点灯に際して、DC-DC コンバータ内蔵 LED(消費電流 114[mA]、1.5[V]時)を用いた。



図 11 ペルチェ素子による発電システム

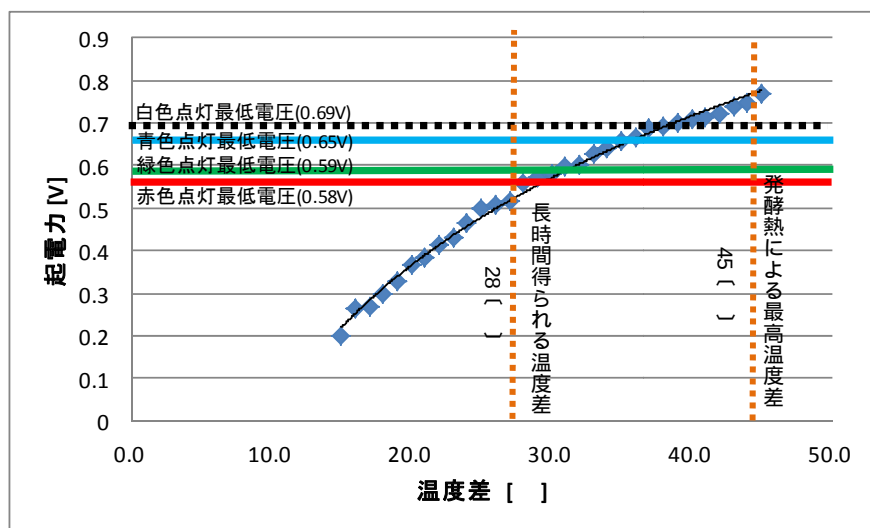


図 12 温度差と起電力の関係

本実験より高熱源側が発酵熱で得られる最高温度 60[°C]で外気温が 20[°C]の場合 0.7[V]の起電力を得ることができる。その際に目標である LED8 個の点灯を確認でき、発酵熱による点灯が現実的となった。しかし、長時間連続して得られる発酵熱は 48[°C]で、温度差が 28[°C]、起電力は 0.55V 程度となる。起電力を大きくするためには、温度差を大きくすればいいので発酵熱の温度が上がらなくてもペルチェ素子の低温側の温度をさげれば起電力は大きくなる。低温側はヒートシンクを用いて外気に放熱しているため、外気温が適用される。そのため冬季等、気温が下がると起電力が大きくなるように考えられる。しかし、気温が下がれば微生物の活動が著しく低下するため、外気温を下げるできない。このため、気温が低い環境下で発酵させるためにはコンポストの保温に気がついた。

(3) 熱回収装置の作製

コンポスト内部において発酵材料の内部で高温となっても、表面ではかなり温度が下がっており、発電システムに効率よく伝熱させることができない。そのため、コンポスト中心部の熱を効率よく表面に伝えるためにヒートパイプを用いた。ヒートパイプとは銅などの熱伝導性の良い金属のパイプ中に熱伝導性の良い作動液を封入した道具である。主に、パソコンの冷却などに用いられている。図13はヒートパイプ内外での熱の動きを表している。

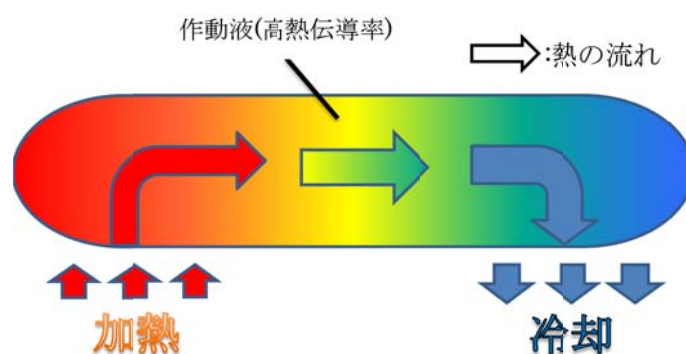


図13 ヒートパイプの原理



図14 本実験で使用したヒートパイプ

コンポスト中心部の高い温度の発酵熱をヒートパイプで効率よくペルチェ素子の高温側に伝える。ペルチェ素子の低温側にはヒートシンクを取り付け、温度差をできるだけ大きくし、発電量を大きくしようと考えた。ヒートシンクとは、円筒型ヒートパイプを曲げたものに金属の薄板を取り付け、接触面を設けたものである。ヒートパイプに金属薄板を取り付けたことによって表面積が増大し、伝熱効率を向上させることができる。本実験ではヒートシンクを低温側のペルチェ素子に取り付けることで低温側のペルチェ素子をできる

だけ低温に保ち発生電圧を大きくするように試みた。また、伝熱面積を大きくするため、一般的に用いられる円筒型のヒートパイプではなく、平型のヒートパイプを 90° 曲げ、伝熱性シリコンで接着し、ペルチェ素子を取り付けた。

3 - 3. 発光部の作製

LED を 8 個点灯させるための回路を作製する。一般に LED は 3V 以上ないと点灯しない。ペルチェ素子による起電力実験の結果からもわかるように、想定される発酵熱の温度では 3[V] もの起電力を発生させることは不可能である。そのため、昇圧する必要がある。本項目では、昇圧回路のひとつである DC-DC コンバータ内蔵の LED を用いた実験とジュールシーフ回路の作製について説明する。

(1) DC-DC コンバータ内蔵 LED を用いた実験

DC-DC コンバータ内蔵 LED において、各色による点灯できる最低電圧は図 12 のように赤色 0.58[V]、緑色 0.59[V]、青色 0.65[V]、白色 0.69[V]となり、この電圧の差を利用して、各色 2 つずつ順次に点灯していく仕組みを作製しようと考えた。しかし、実際には同じ色であってもそれぞれに点灯し始める電圧が違っており、緑色より青色が先に点灯してしまう場合などがあった。また、今回の実験ではかなり狭い範囲内での起電力の差を利用するため、このような仕組みで順次点灯させる装置の作製はできなかった。DC-DC コンバータ内蔵 LED について実際に発酵熱により点灯させたところヒーターを使った実験では赤色から白色まですべて点灯させることができたが、発酵熱による実験では赤色の LED しか点灯できなかった。そのため、DC-DC コンバータ内蔵の赤色の LED でも 8 個点灯できるはずであるが、手持ちが 4 個しかなかったため、後述のジュールシーフ回路を自作した。

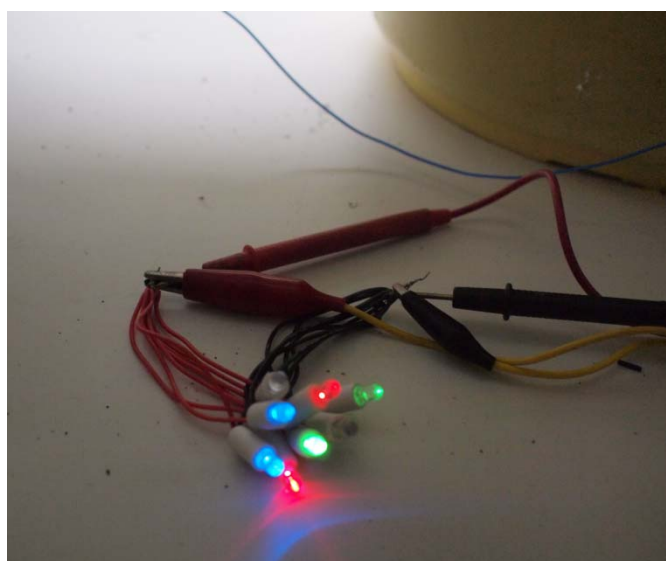


図 15 DC-DC コンバータ内蔵 LED の点灯状況

(2) ジュールシーフ回路の作製¹

ジュールシーフ回路とは昇圧回路で、DC-DC コンバータのひとつでもある。コイルに流れる電流の変化により磁気が発生し、その勢いで電圧が発生する。これをトランジスタのスイッチング作用を用いて人の目には見えなくらいに点滅させ点灯しているように見せる回路である。本実験をおこなうにあたり、次のようなジュールシーフ回路を作製した。回路図を図 16 に、作製した発光装置を図 17 に示す。本回路を用いることでわずか 0.55[V] という低い電圧でも少し暗いが点灯させることができた。

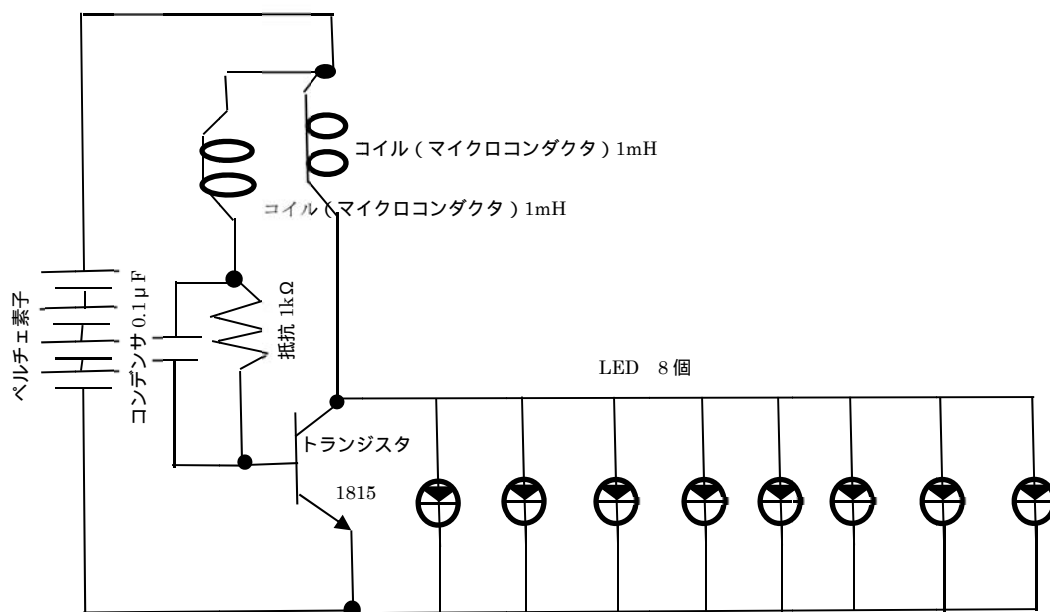


図 16 ジュールシーフの回路図

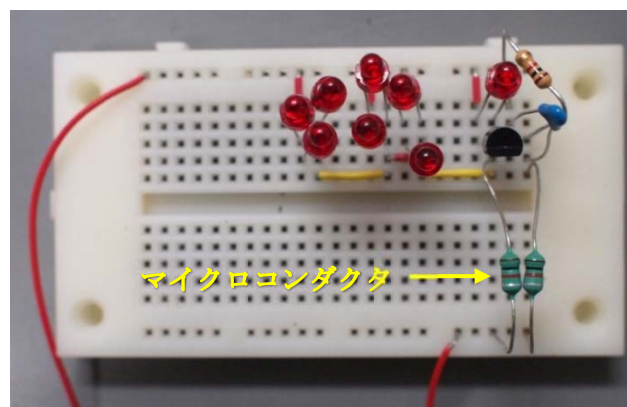


図 17 ジュールシーフ回路を用いた発光装置

3 - 4 . 発酵熱による発電システムの作製

これまでの実験結果をまとめて、発酵熱による発電システムを作製した。本システムについて図 18 に、また概要について図 19 に示す。



図 18 発酵熱による発電システム

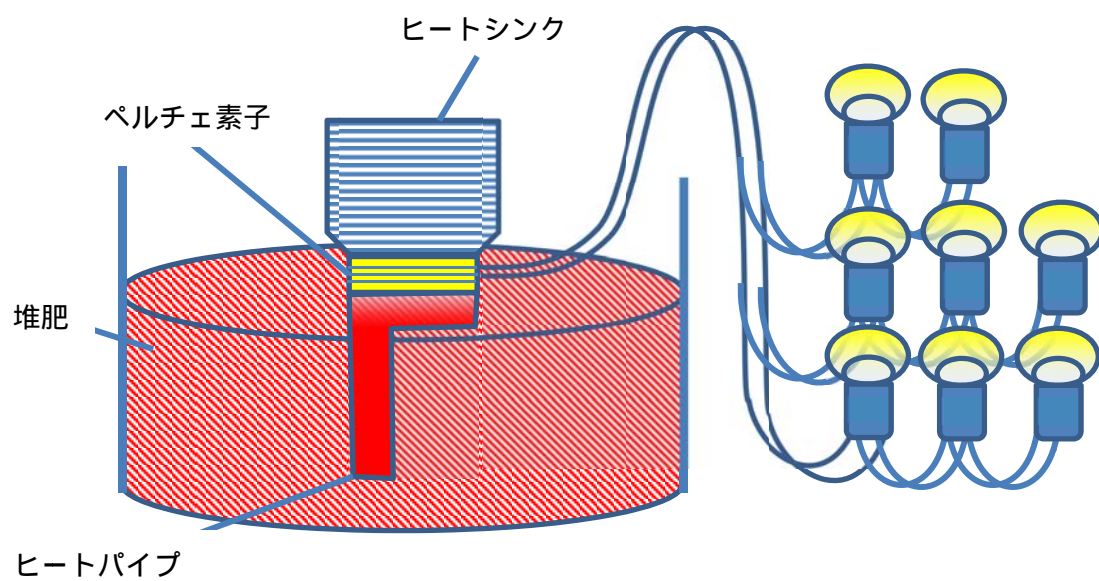


図 19 発酵熱による発電システムの概要

発酵熱の実験結果より、発酵熱発電実験用に配合 3 - 1 および 4 - 1 を作製した。はんぺんが確認されるまで 2 週間ほど嫌気発酵させた。寒い時期となり、これまでよりはんぺんの作製に時間がかかった。その後再度水分の調整と攪拌を行い、好気発酵をすることにより発酵熱を確認できた。発酵温度 46[]、気温 14[]、において発電実験を行った。ペルチェ素子の実験では、素子を直列に 2 枚重ねて実験を行ったが本システムでは起電力をより高くするため、素子を直列に 4 枚重ねた。発酵熱（高熱）側が 46.2[]、放熱（低熱）側が 14.4[]、温度差 31.8[]において 0.76[V]もの起電力を得ることができた。ペルチェ素子の実験結果ら DC-DC コンバータ内蔵 LED、赤色から白色まで 8 個すべて点灯するはずであるが、実際には点灯させることができなかった。そのため、ジュールシーフ回路を使用して赤色 LED を 8 個点灯させることができた。点灯状況について図 20 および図 21 に示す。

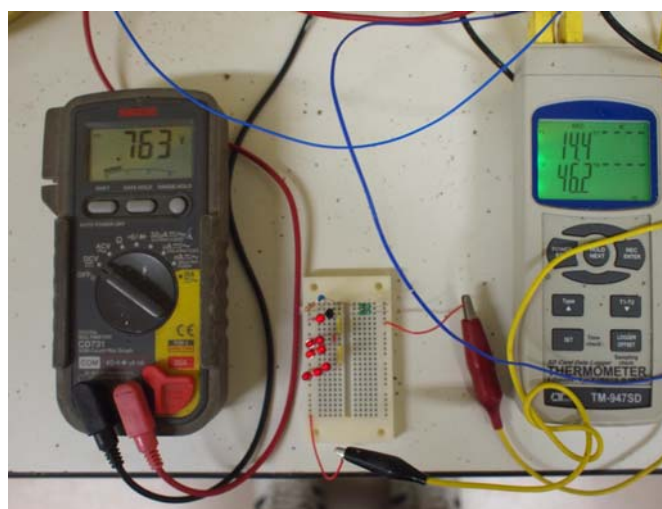


図 20 点灯状況(1)

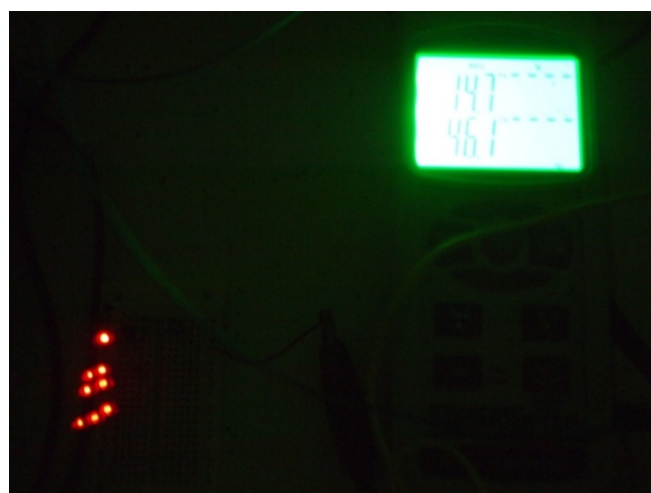


図 21 点灯状況(2)

4. まとめ

本実験では発酵熱による発電システムの構築を目的に 発酵熱に関する実験、 低温度差における発電システムの作製、 低電圧における LED の点灯を目標に 3 つの班に分かれて実験を行った。ここでは各班の目標とその結果についてまとめる。

発酵熱班

目標：高い温度で発酵する配合を見つける。

本実験より、発酵温度が 60[] 程度まで上昇する配合を見つけることができた。また、発酵温度は 48[] 程度であるが、発酵時間が長く発生熱量が多い配合についてもつけることができた。しかし、連続して長時間発酵ができないため、現実的な装置ではもっと大規模にしなければならないと感じた。

発電班

目標：発酵熱を効率よく変換できる発電システムを作製する。

ペルチェ素子とヒートパイプを組み合わせ、発酵熱による温度と外気温の差、40[] から 30[] 程度から LED を点灯させる程度の発電できるシステムを作製することができた。

LED 発光班

目標(1)：定電圧において、LED を 8 個点灯させる。

ジュールシーフ回路を用いて 0.55V という低電圧においても LED を 8 個点灯させることができた。

目標(2)：発酵熱の温度によって順次 LED が点灯していくような回路を作製する。

今回の考えた回路では LED の個体による点灯し始める電圧の差が小さいためできなかった。目的のような回路の作製にはマイコンなどを利用しなければいけないと考える。

そして、3 つの班の力を合わせることで最終目標である「発酵熱で LED を 8 個、発光させる！！」ことができた。

5. おわりに

本実験で堆肥化された試料は家庭菜園等の肥料として利用してもらう予定である。竹チップによる発酵には失敗をしたが、もし実現できれば、竹を整備することで里山を守り、お湯をつくったり、発電ができたり、堆肥にもなり、一石で二鳥、にも三鳥にでもなると考えられる。また、本実験は発酵の他に低温度差による発電がひとつのテーマであった。私たちの身のまわりの廃熱からも LED の照明等ができることが分かった。発酵に関して、指導教員も含めてみな初心者であったため、手探りの状態から実験を開始した。発酵には独特なおいが生じるため周囲の研究室に迷惑をかけた。また、コンポスト内に蛆がわい

てその対応をしたのも今となってはいい思い出である。一方、電気回路について通用している者が少なく、オシロスコープなどを用いてもうすこし質の高い実験ができたのではないかと反省している。それぞれの実験は未熟であったが、それぞれの実験結果を集結させひとつのシステムを完成させることができた。私たちはこれから、様々な機械類が集結してひとつのプラントとして動く船舶のエンジニアとして活躍するに当たり、本実験をとおりして様々な事象をひとつにまとめて運用していくということの面白さを学ぶことができた。

謝辞

本実験を行うに当たり、このような機会と実験費用の助成をしていただいた株式会社八光電機のみなさま。ご指導ご助言をしていただいた山口教官、技術専門職員の本庄様、堀様。米ぬかや竹チップを分けてくださったり、発酵に関するアドバイスをくださったりした地域住民の方々。多くの方に支えられながら実験をおこなうことができました。この場をお借りして御礼申し上げます。ありがとうございました。

参考文献

- 1 suzukikantarou 氏制作 youtube 動画「ジュールシーフをコンパクト化」より