

ゼーベック効果を利用した太陽熱発電システムの研究

栃木県立宇都宮清陵高等学校 科学研究部
大橋淳一 江崎徹 小倉陽祐 岡本宗浩

1. はじめに

サーモジュールとして市販されているペルチェ素子を用いた太陽熱発電システムの可能性を検証した。ペルチェ素子の両面に温度差を与えると熱起電力が発生する(ゼーベック効果)。高温熱源として太陽光で暖められたトタン屋根を、低温側として水冷方式を採用した。水冷モジュールにペルチェ素子をはり付けた発電モジュールを、施工がきわめて単純になるように、トタン屋根にはり付ける方式を考案し、実証試験を行い可能性を検討した。

2. 研究の動機

京都議定書で温室効果ガスの削減目標が設定されたが本当に達成できるのか不安視する向きもある。省エネルギーという言葉は誰もが知っているが、切実に現状を憂い真剣に実践している者がどれほどいるのか疑問である。単なる流行語ではすまされないと思うのだが。

本校では昼休みに“省エネルギーに協力してください”と放送が入る。しかし、誰かが消すことを期待して、なかなか積極的に電灯を消そうとはしない。“何年何組電灯を消しなさい”と再度放送が入る。

エネルギーの大量消費に支えられた現在の生活レベルを下げることはできないだろうと言う意見を聞いたことがある。誰かが何とかしてくれると、他人事として考える風潮があるからだ。さらに科学技術の進歩は何でも解決してくれると漠然と考えている事も原因と考えられる。脱化石燃料として風力・太陽光など誰もが認知しており、これらの新エネルギー源が解決策であると誤認している。定性的な理解であれば気休めであり、もっと地に足をつけた定量的な理解が不可欠であることは言うまでもない。

このような背景から、新エネルギー源としての定量的な考察をし、どの程度有効であるか冷静に判断しようとの考えから今回の研究を始めることになった。

3. 研究の目的

今回の研究は太陽光を間接的に利用する温度差発電である。水を循環して低温側を作るが、発電すると同時に水が加熱され温水ができる。つまりコジェネレーションシステムに発展できるのではないかと考えた。また、微小な温度差で発電できれば、地熱や河川の熱など莫大なエネルギー源を手にすることができはずで、今まで利用できなかった熱源の有効利用が可能になるのではないかと考えた。

そこで、ペルチェ素子を利用してどの程度の温度差で、どれだけの熱効率で発電できるか、その可能性を探る目的で研究を開始した。

4. 実験

ペルチェ素子の発電機としての基本的な特性を調べる必要があると考えた。温度差を与えたときにどの程度の電圧（熱起電力）が発生するか測定する必要がある。また電池の特性として最大出力電力も測定する必要がある

測定は一方を温め、他方を冷やせばよいので比較的簡単にできると考えた。利用したペルチェ素子は4 cm × 4 cmの大きさで、8.5 Aで最大吸熱量80 Wタイプである。そこで、低温側を水道水（流水）で、高温側をお湯を使って実現できると単純に考えた。

とりあえず予備実験をおこない可能性を探ることにしたが、結論から言うと再現性のある測定をするのは大変難しいことが分かった。

温度差を一定にコントロールすることは大変難しかった。温度を一定にするのは不可能に近い。そこで次のようないくつかの方法で問題点を打開して実験をおこなった。

1. 短時間で測定する。温度が変化する前に測定を終える。
2. 温度が変化しないような熱容量の大きな熱源を利用する。

しかし、一回の実験は短時間でおわしても、複数回の実験では条件が徐々に変化してしまう。そこで低温側の熱源（吸熱）として今年度本校でおこなった“ものづくり体験教室”で利用した電子冷却モジュールを利用した測定方法を開発した。また高温側熱源としてペルチェ素子や電力用トランジスターを用いる事にした。この測定方法ならば、お湯の入れ替えや、氷の補給など面倒な準備から開放され、何度でも手軽に実験できるようになった。

予備実験から順におこなった実験の説明を次に示す。

(1)予備実験 「温度差と熱起電力」

実験の目的

温度差でどれだけの熱起電力が発生するか測定する。

実験方法

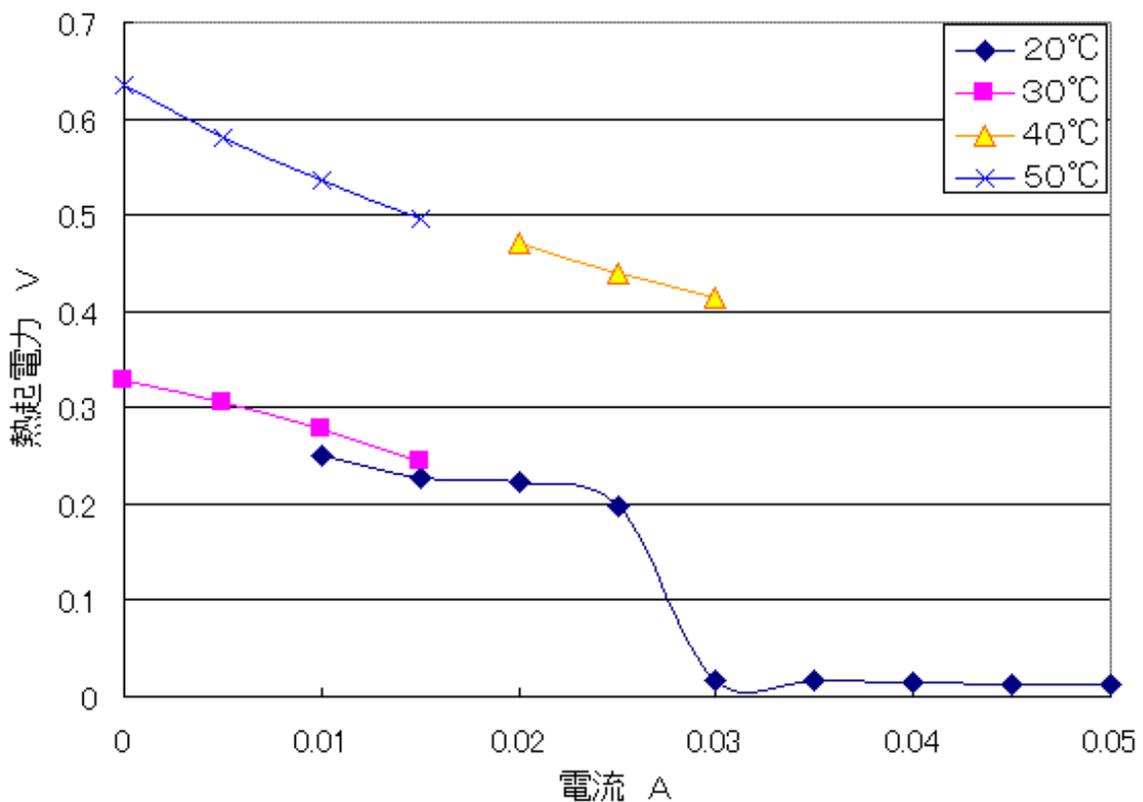
写真(1) - 1



水道水を流した 2 cm × 2 cm のアルミパイプ 2 本を低温側とした。高温側は熱湯を入れた金属製(ステンレス)のボールを使い、高温側の温度を調整し温度差を作り熱起電力を測定した。

測定結果

グラフ(1) - 1 温度差別 出力電流と熱起電力



考察・反省

一言で言えば、全く使い物にならない測定データであった。再現性も悪く、測定の度にデータがばらついてしまった。失敗実験ではあったが、ある程度傾向はつかめた。

- ・ 40 程度の温度差で0.5V程度の起電力が得られる。
- ・ 20 の温度差で25mA, 0.2Vの出力が得られる。

この測定結果から熱発電システムを作るにはあまりにも大きな温度差が必要であり。しかも出力電力も小さいので実現不可能であると判断できる。しかし、以前一方をロウソクで加熱し他方を氷で冷却した実験では小型のモーターが回転した事実から考えて大変おかしな結果である。

再度測定をおこないペルチェ素子の可能性を確認する必要がある。

(2)出力電力の測定1

実験の目的

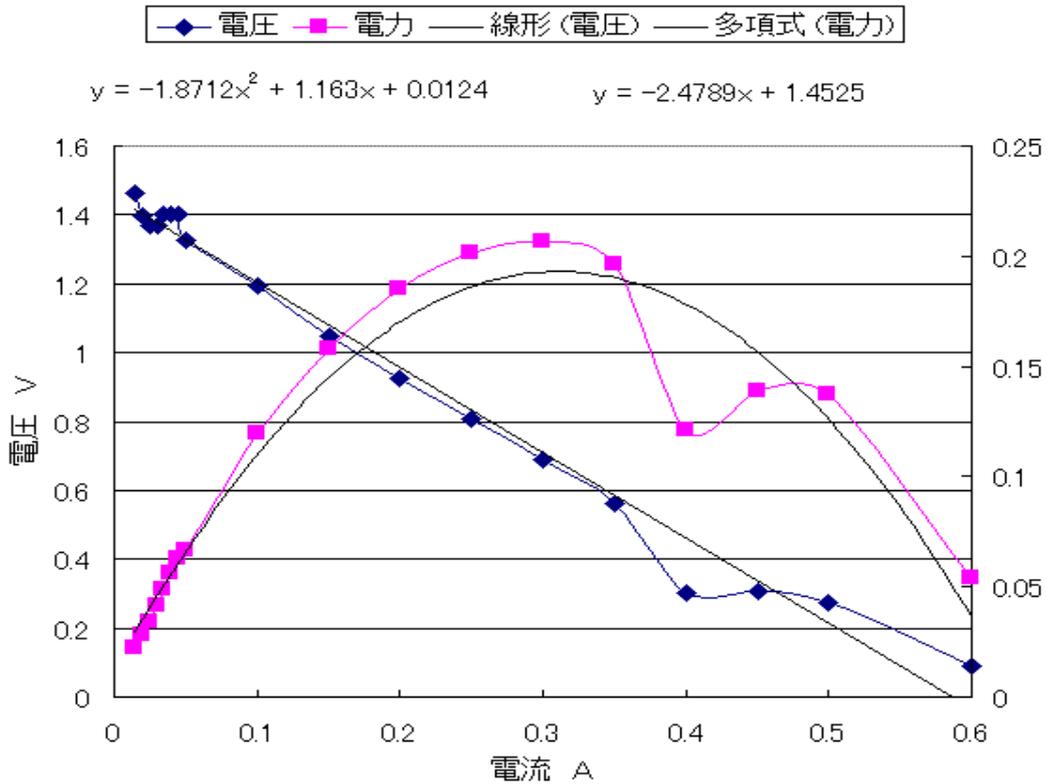
ペルチェ素子の出力電力の測定をおこなう。

実験方法

予備実験の反省をもとに、高温熱源にボトルカンにお湯を入れ利用。温度が大きく変化しないように実験を短時間で終了させた。また熱的な接触が十分になるように接触面にシリコングリスを塗った。

写真(2) - 1





温度差: 43.5°C~46°C

電流(mA)	電圧(V)	電力(w)
0.015	1.46	0.022
0.020	1.40	0.028
0.025	1.37	0.034
0.030	1.37	0.041
0.035	1.40	0.049
0.040	1.40	0.056
0.045	1.40	0.063
0.050	1.33	0.066
0.100	1.19	0.119
0.150	1.05	0.158
0.200	0.92	0.185
0.250	0.81	0.201
0.300	0.69	0.206
0.350	0.56	0.196
0.400	0.30	0.121
0.450	0.31	0.139
0.500	0.27	0.137
0.600	0.09	0.054

考察・反省

温度差は平均して約45，無負荷での熱起電力はおおよそ乾電池と同じ1.5Vであり，最大出力電力は0.2Wであった。負荷電流を増加させながら電圧を測定した。電圧降下は電流の増加に対して直線的で内部抵抗は2.5程度であった。

内部抵抗が一定であるので，最大電力を引き出すには無負荷での電圧の半分の端子電圧になるまで電流を流したポイントとなる。これは一般の乾電池と同じである。

この程度の電圧・電力ならば利用価値はあると考えられる。しかし，最大0.2Wは小さな出力である。さらに温度差を付けて出力電力の測定をおこなうことにした。

(3) 出力電力の測定2

実験の目的

ペルチェ素子の出力電力の測定をおこなう。温度変化が小さくなるような熱容量が大きい熱源を選んだ。

実験方法

高温熱源にアイロンを利用。温度が大きく変化しないように実験を短時間で終了させた。低温

側は写真のように氷で冷却した。

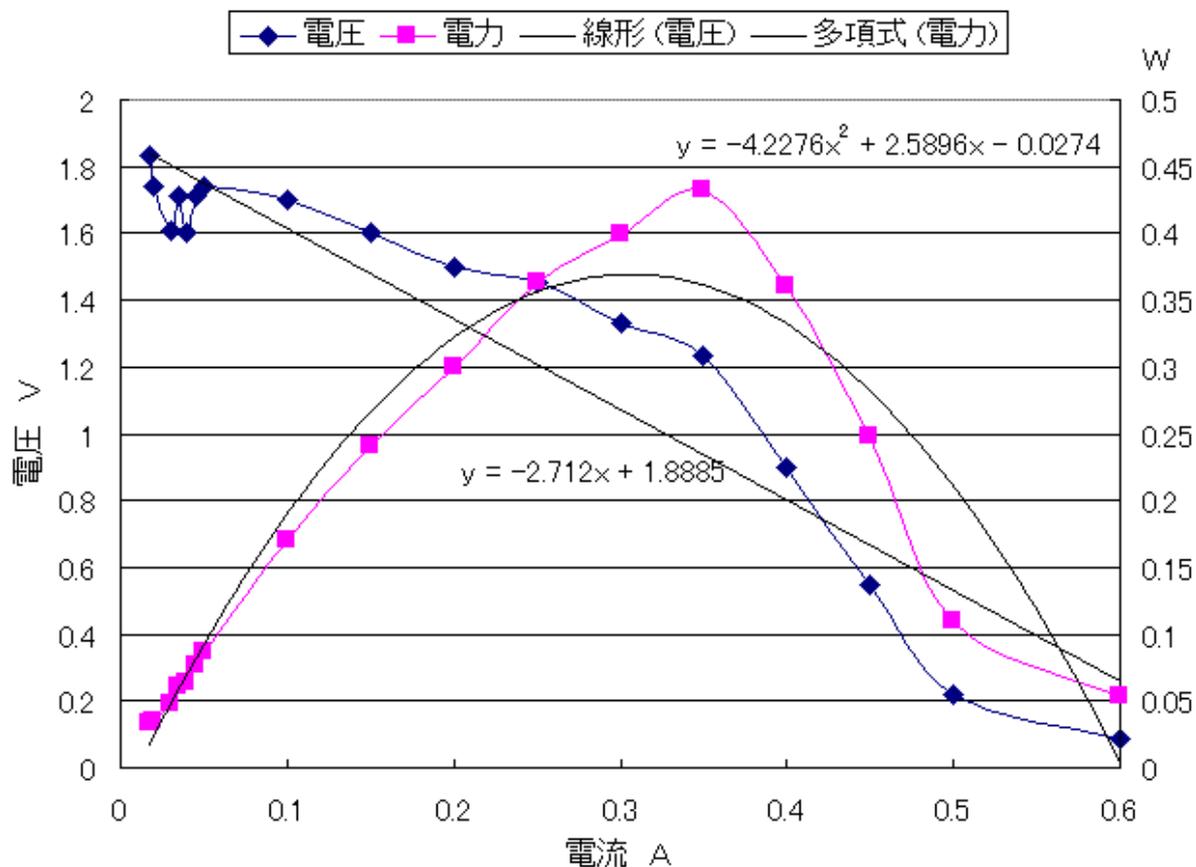
写真(3) - 1



測定結果

温度差 68

グラフ(3) - 1



考察・反省

温度差が6.8℃，開放電圧が1.9V，最大出力電力0.45Wであった。

(1) 予備実験，(2) 出力電力の測定1，(3) 出力電力の測定2 の実験結果を比較すると大きな違いがある。特に予備実験の熱起電力が他と比較して大変小さい。この原因は予備実験での温度測定ポイントは写真(1) - 1の様に水温(お湯)の温度を直接測定したことが考えられる。ボールの材質であるステンレスは熱伝導の悪い金属でもあり，この温度はペルチェ素子の高温側温度ではなかった。熱接触が悪く正しく測定されていない可能性も大きい。(2) (3) 出力電力の測定は容器の温度，及びアイロンの発熱面で測定しているのでペルチェ素子の温度に今までよりは近い温度が測定されたと考えられる。

しかし，グラフ(3) - 1の形を見ると，電圧に対する電流の変化はかなり変動しているので測定に問題があると考えられる。写真(3) - 1の様に直接氷をふれさせているので微妙に温度が変動していたと想像できる。

正しい熱起電力が測定できるような測定方法を考案する必要がある。

(4) 熱起電力の測定(追試)

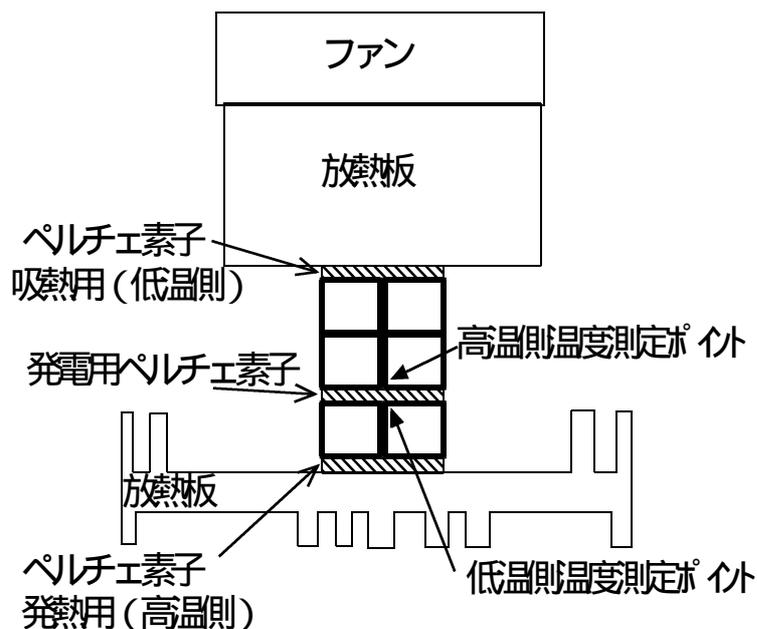
実験の目的

ペルチェ素子の熱起電力の測定。どれだけの温度差で何Vの熱起電力が発生するか測定する。

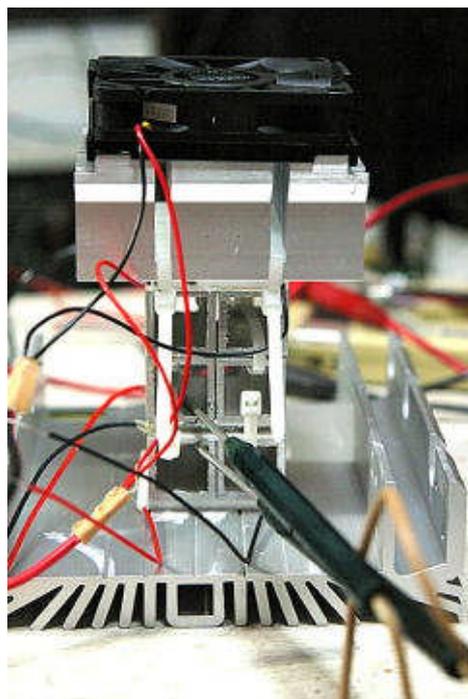
実験方法

今までの測定方法を反省し、正しくペルチェ素子両面の温度を測定できるように工夫した。

写真(4) - 1



図(4) - 1



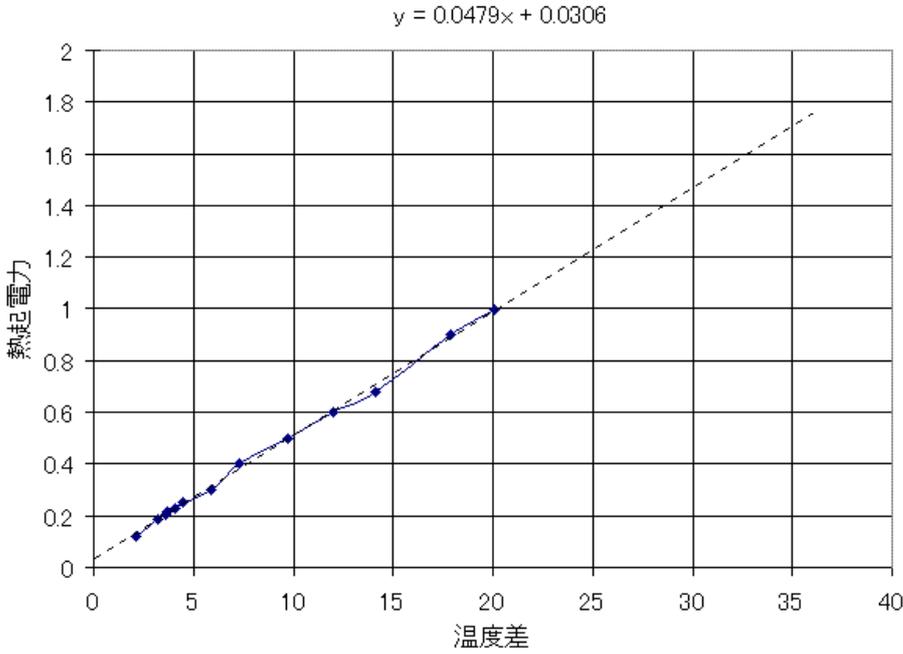
写真(4) - 2

温度差を発生させるために、低温側はペルチェ素子を使い冷却、高温側もペルチェ素子の発熱側を利用した。温度の測定はデジタル温度計を使い、温度測定場所はアルミのブロックの内面でおこなった。(写真参照のこと)

吸熱側のペルチェ素子、及び発熱側のペルチェ素子に通電すると、徐々に温度差が開いていく、そこで発電用のペルチェ素子の電圧をそれぞれの温度とともに測定していった。



長時間通電すると、安定状態になり、温度の変化は殆ど無くなる。その状態に達した時点で、負荷電流を変えながら端子電圧を測定し最大電力を測定した。それぞれのペルチェ素子に流す電流で温度差は変化するが、17 程度の温度差を得るのがやっとであった。

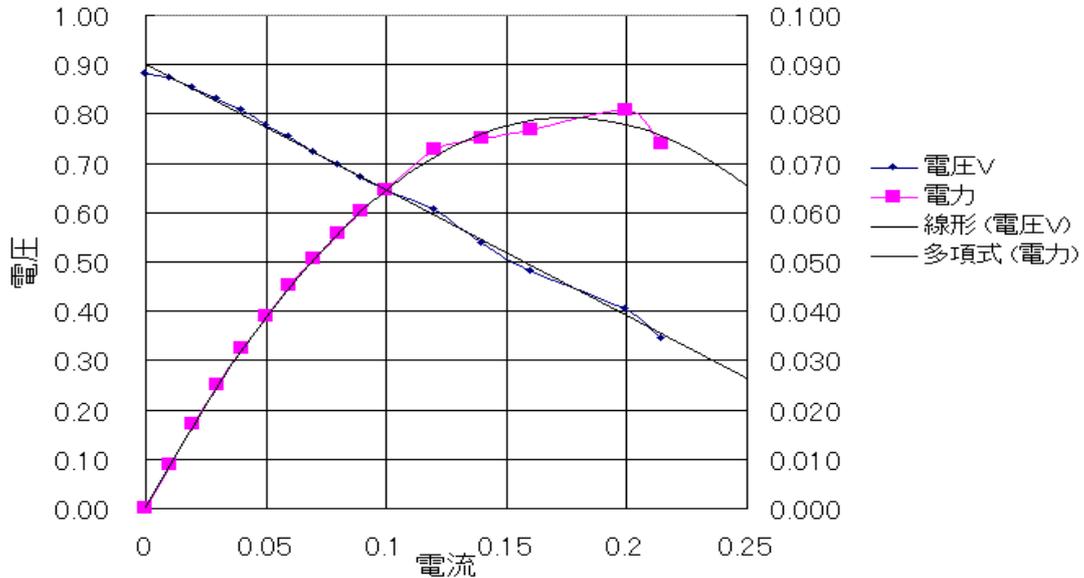


温度差	熱起電力V
2.1	0.123
3.2	0.184
3.6	0.203
3.7	0.215
4.1	0.230
4.5	0.251
5.9	0.300
7.3	0.400
9.7	0.500
12.0	0.600
14.1	0.676
17.9	0.900
20.1	1.000

表(4) - 1

グラフ(4) - 2 出力電力(温度差16.8)

$y = -2.5553x^2 + 0.8996x + 0.0001$ $y = -2.5452x + 0.8999$



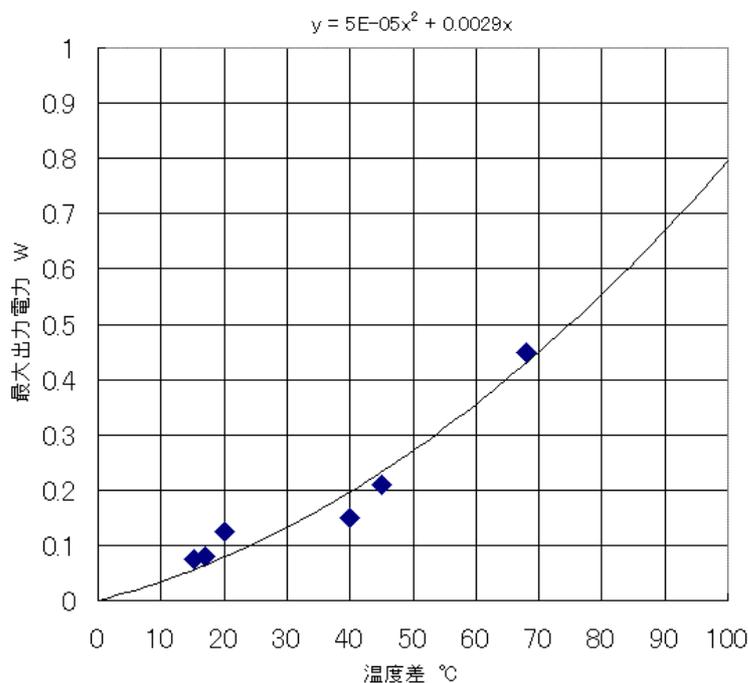
考察

高温側，低温側の温度変化を小さくした結果，次の事が確認できた。

1. 熱起電力はほぼ温度差に比例する。
2. ペルチェ素子の内部抵抗は電流によらずほぼ一定である。2.5 程度である。
(直流抵抗をテスターで測定すると2.1 である。)
3. 一般の電池と同じように，最大電力は開放電圧が半分にドロップした電流値で得られる。

さらに、今までおこなった実験で得られた最大出力電力と、その時の温度差をもとにグラフにまとめてみると次のグラフのようになった。

グラフ(4) - 3



ペルチェ素子を通過する熱量に最大出力電力が関係すると考えれば、ペルチェ素子を通過する熱量は、両面の温度差に比例するはずである。また実測の結果、ペルチェ素子の熱起電力も温度差に比例する。従って最大出力電力は温度差の二乗に比例すると考えられる。そこで最大出力電力は温度の二乗に比例すると仮定してグラフを書いた。この仮定をもとに考察すると。

4．最大出力電力は温度差の二乗に比例する。さらに、この素子から取り出せる最大電力は温度差の最大値を素子が壊れる限界を100 とすれば、1 W程度である。

太陽電池の単価は1KW以上で1W当たり750円、数W程度の太陽電池パネルは、1W当たり3000円程度である。方やペルチェ素子は1個2000円程度であり、太陽電池とコスト対発電能力を比較すると若干太陽電池より安上がりとなる。

しかし、この見積もりは温度差を100 程度と仮定した場合であり、実証試験の結果を考慮しなければ判断できない微妙な状況である。

5. 太陽熱発電システムの実証試験

基本的なペルチェ素子の特性を調べた結果、太陽電池と同程度の性能が得られる可能性があると判断した。但し、実際に発電システムを構築した場合、具体的には低温側を水道水による冷却、高温側を太陽光で加熱されたトタン屋根を熱源とし、どの程度の特性が得られるか実験することにした。

実験の目的

太陽光で温められた屋根のトタン板にペルチェ素子を貼り付けて電力を取り出すことができるか実験した。実験ではペルチェ素子をどの程度の間隔で取り付ければ良いかを検証するためにトタン板の面積を変え実測した。

写真5 - 1 実験風景



実験方法

表面を黒く塗ったトタンの裏側にペルチェ素子をシリコングリスを塗りはり付ける。ペルチェ素子は水道水を流して冷却したアルミのパイプ（肉厚2mm、2cm×2cm）にやはりシリコングリスを塗り、貼り付けて低温側とした。水は水道水を流し続けた。トタンは50cm×50cm、40cm×40cm、30cm×30cm、20cm×20cm、10cm×10cmの面積で測定した。

測定結果

ア. 50×50

電流(mA)	電圧(V)	電力(W)
100	0.01	0.001
50	0.18	0.009
30	0.2	0.006
20	0.2	0.004

板の外側から5cmごとの温度

50→53.1→49.2→54.2→49.3→46.4

ウ. 30×30

電流(mA)	電圧(V)	電力(W)
80	0.09	0.0072
40	0.1	0.004
30	0.1	0.003
20	0.15	0.003
8	0.1	0.0008

54.4→56.9→57.9→55.4(°C)

オ. 10×10

電流(mA)	電圧(V)	電力(W)
40	0.1	0.004
30	0.1	0.003
20	0.1	0.002

50.8→47.4(°C)

イ. 40×40

電流(mA)	電圧(V)	電力(W)
100	0.01	0.001
50	0.1	0.005
40	0.12	0.0048
30	0.18	0.0054
20	0.2	0.004
10	0.2	0.002

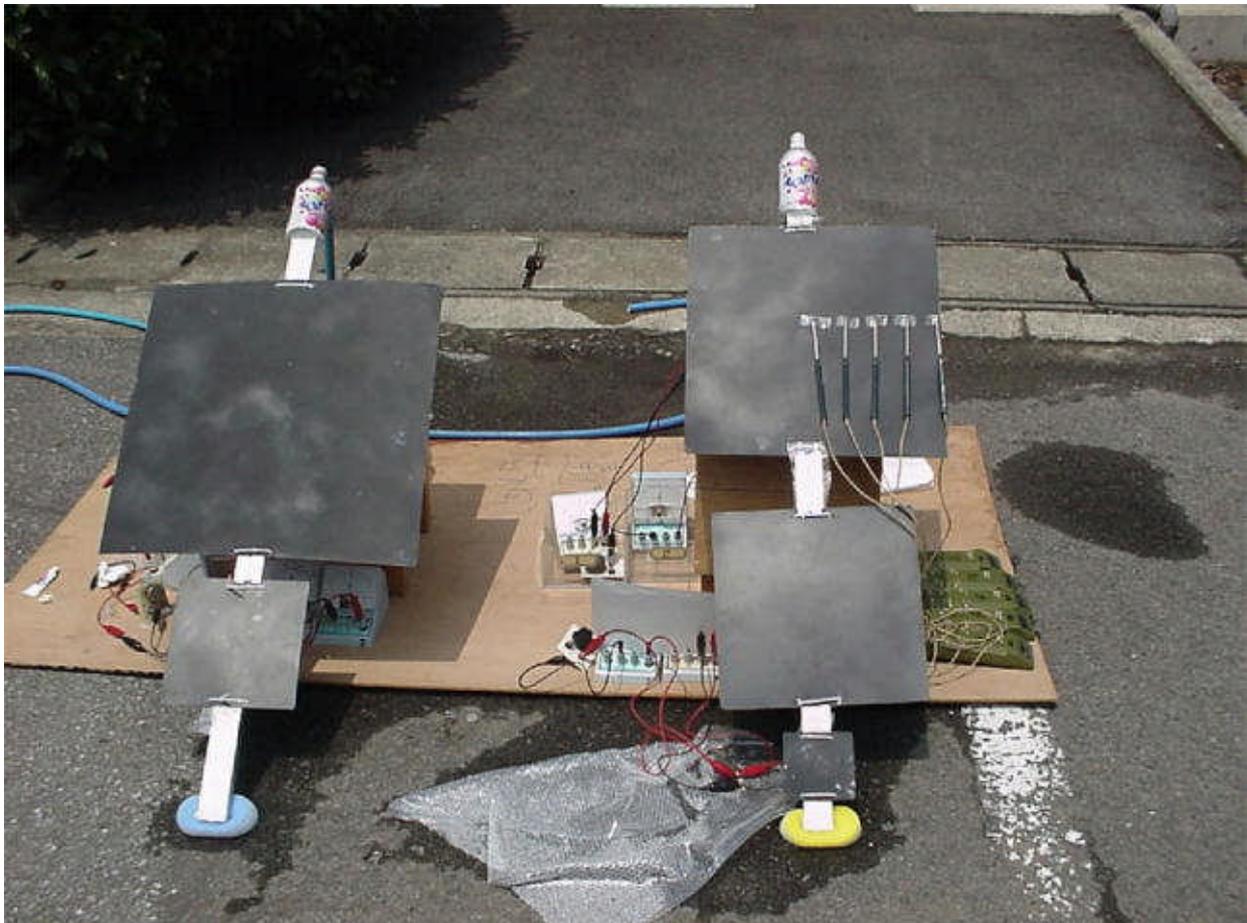
48.2→50.5→50.1→48.3→46.4 (°C)

エ. 20×20

電流(mA)	電圧(V)	電力(W)
60	0.01	0.0006
30	0.1	0.003
20	0.1	0.002
10	0.15	0.0015

52.2→53.4→43.4(°C)

写真 5 - 2



考察

水温は25 程度。太陽光で加熱されたトタンの温度はどの位置でも50 程度あり、従って温度差は25 程度はある。しかし、

- 1．最大電力での電圧の2倍が開放電圧である。最大電力を得たときの電圧が約0.2Vであるから、開放電圧は0.4Vであると思われるので、グラフ(4) - 1よりペルチェ素子両面の温度差は7 程度でしかない。
- 2．出力電力は0.01W程度である。温度差25 で期待される電力の10%程度である。

この結果を見ると熱源からエネルギーを取り出せていない事が解る。地表面では $0.1\text{W}/\text{cm}^2$ の太陽エネルギーが降り注いでいる。従って 100cm^2 の面積があれば10Wのエネルギーが常時供給されるはずである。今回の実験で2500, 1600, 900, 400, 100cm^2 と面積を変えて測定したが殆ど違いはなかった。

ペルチェ素子の変換効率が悪い可能性がある。さらに、熱的な接触が不十分であった事と、ペルチェ素子の面積は 16cm^2 と小さく周辺のトタンからの熱の供給が間に合わない、言い換えればトタンの熱抵抗が大きくペルチェ素子の接触面では温度が低下していた事も原因であると考えられる。従って太陽熱を集めるトタンの面積を変えても出力に殆ど違いがなかったと考えられる。

以上の考察をふまえて次の実験・考察を実施する事にした。

- 1．ペルチェ素子のエネルギー変換効率の測定。
- 2．ペルチェ素子への熱エネルギーの供給効率の考察

1．に関してはまさにペルチェ素子が持つ効率の測定実験である。2．に関しては、例えると“電池から取り出せるエネルギーは最大で50%、負荷を変えると取り出せるエネルギー量が変わる。”のと同じように熱供給に関しても類似の原理があるのか考察し、ペルチェ素子と特性から実際の効率を見積もる必要があると考えたためである。

6. ペルチェ素子のエネルギー変換効率測定

実験の目的

太陽電池は年々変換効率が向上し、システムに組み上げた状態でも10%を越えるようになって
いる。ペルチェ素子の可能性を探るためにエネルギー変換効率の測定をおこなうことにした。

実験の方法

図 6 - 1

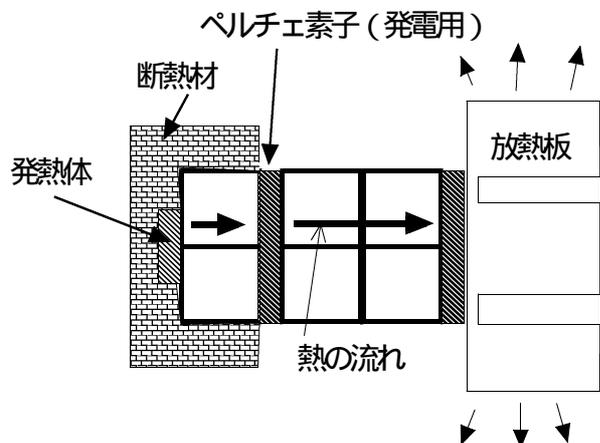
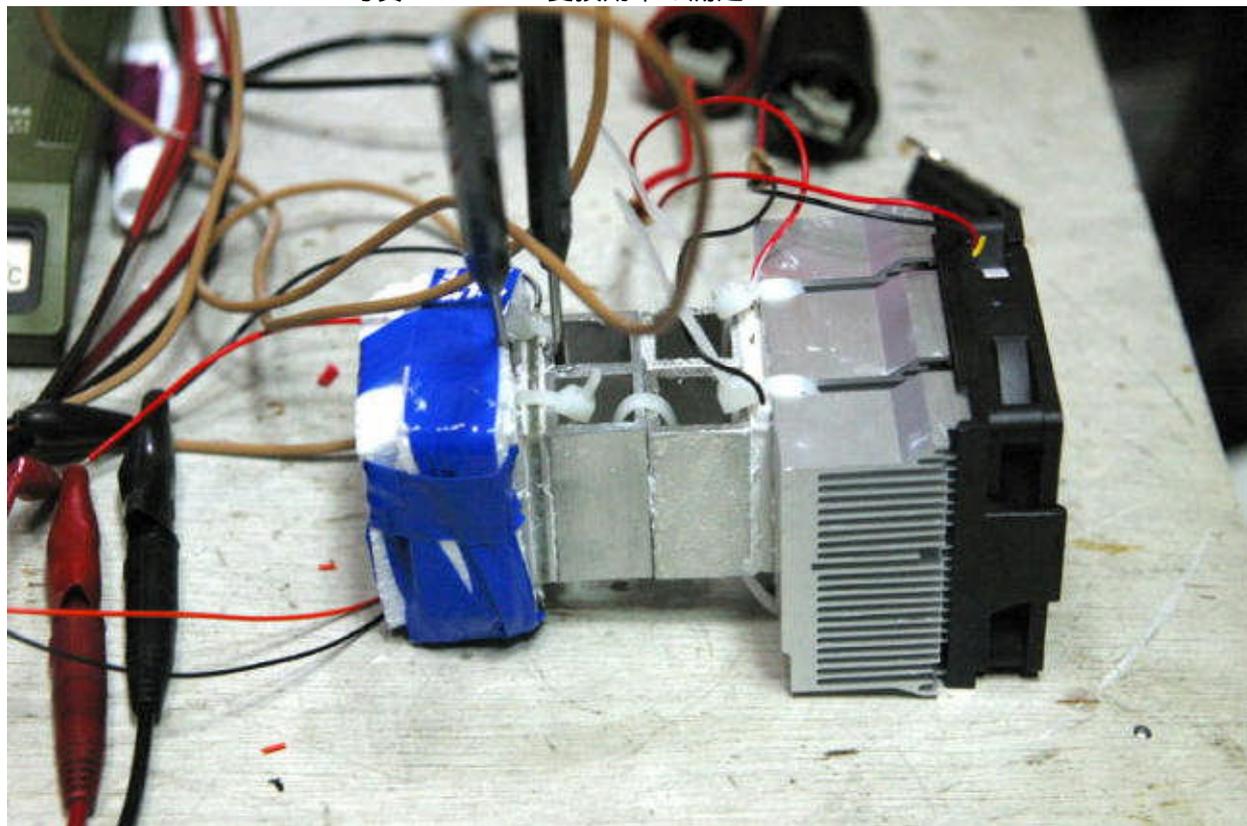


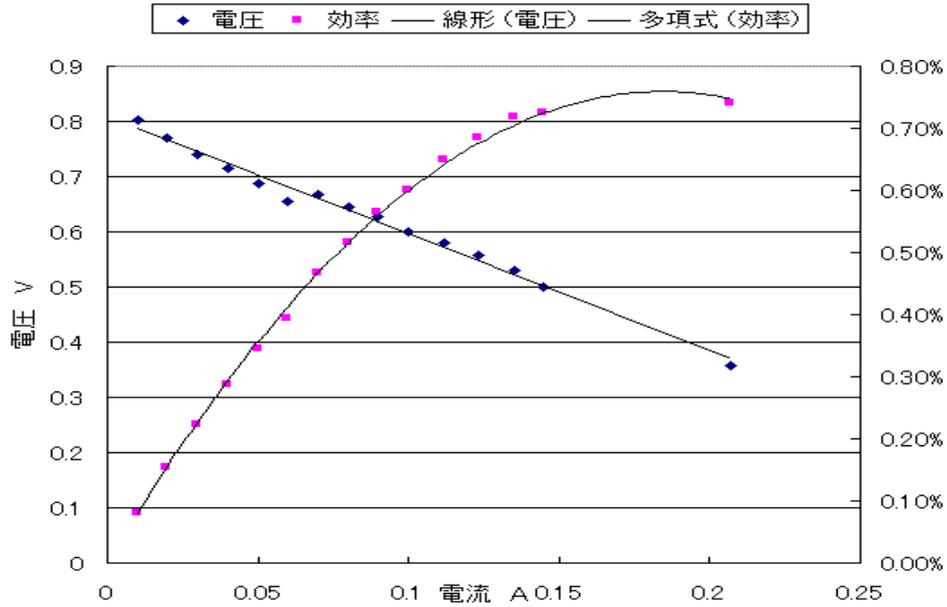
図 6 - 1 を参照してください。断熱材で囲ま
れた中に小さな発熱体(パワートランジスタ
利用)があり一定の熱量: Q 「J/s」を発熱
させる。熱量は殆ど全てが発電用のペルチェ
素子を通して空気中に逃げていく。このと
きペルチェ素子の最大出力電力 q 「J/s」を
測定すれば、効率は

$$\text{効率} = \frac{q}{Q} \times 100 \text{ 「\%」} \quad \text{で計算することができる。}$$

写真 6 - 1 変換効率の測定



なお、発熱体では10Wの熱量を発生させ、温度が安定した状態から測定を開始した。



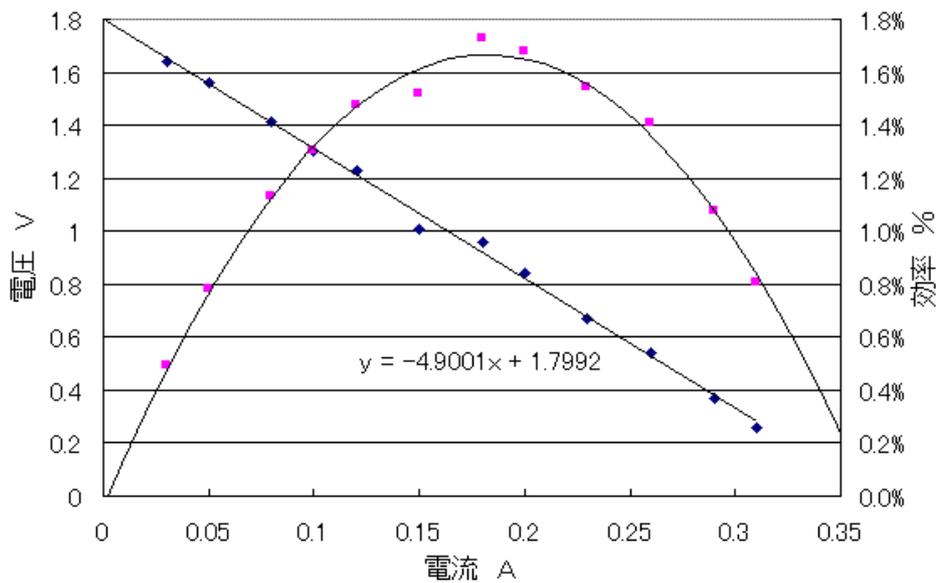
測定の結果，エネルギー変換効率が約 1 % と大変悪い事がわかる。

この実験では一定の熱量をペルチェ素子を通過させたが，温度差を 16 程度発生させるのが限界であった。有限の熱量しか発生させられないのでこのような結果になった。しかし，この状況はタンにはり付けたときと同じである。

実験で気づいた事だが，熱起電力を大きくさせるために温度差をさらに大きくさせるために，ペルチェ素子の熱抵抗が大きければいいのだと思った。別な特性のペルチェ素子を選択する方法もあるが，2 このペルチェ素子と重ねれば 2 倍の温度差が得られるはずだと気づいた。

そこで，同じペルチェ素子を 2 枚重ねて同じ実験を実施した。

グラフ 6 - 2



再実験の結果がグラフ 6 - 2 である。グラフ 6 - 1 のペルチェ素子一個の場合の効率の丁度 2 倍になった。得られた温度差も理論道理約 2 倍の 3.4 となった。

この結果を見ると、電池から取り出せる電力との類推で次のような事が言えると思う。

熱源が持つ熱抵抗は存在するはずである。熱源に対してペルチェ素子の熱抵抗が極端に小さい場合、熱はスムーズに通過できるが温度差が生じない。従って熱起電力が低下して電力を取り出すことができない。従ってペルチェ素子の熱抵抗が重要なファクターになることが予想される。

そこでペルチェ素子の熱抵抗を測定して考察した。

7. ペルチェ素子の熱抵抗の測定

実験の方法

図 6 - 1 の実験方法で、ペルチェ素子から取り出す電流値によって、両面の温度がどうなるかを測定した。予測として熱起電力を発生させているペルチェ素子から電流を流すと熱抵抗が小さくなることが予想される。

測定結果

表 7 - 1

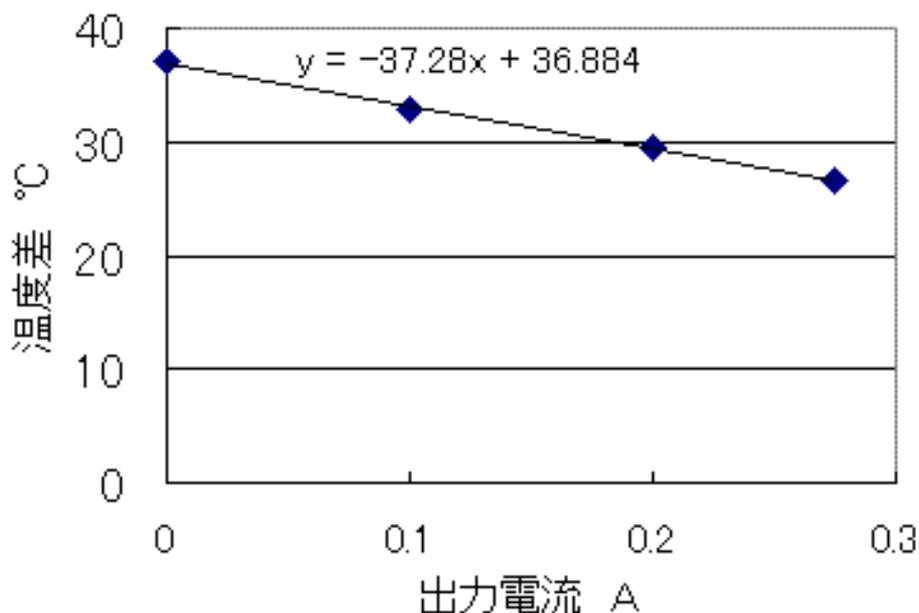
2 個重ね

電流 A	温度 1	温度 2	温度差	熱抵抗 /W
0	54.8	17.8	37	3.7
0.1	50.5	17.6	32.9	3.29
0.2	48.3	18.7	29.6	2.96
0.275	45.9	19.3	26.6	2.66

なお 1 個の場合、電極オープンで 2.0 /W、ショートで 1.2 /W

熱抵抗 2.0 /W とは、1W の熱が通過すると 2.0 の温度差を生じるという意味。

グラフ 7 - 1



考察

熱抵抗に関して、仮に無限大であれば全く熱が流れない断熱材である。ペルチェ素子を使った熱発電システムを考えた場合、電力を取り出さないとき、ペルチェ素子を熱量が通過してしまうというは無駄にエネルギー源から熱量を消費することになる。従ってペルチェ素子の熱抵抗は大きいほど効率が高くなると考えられる。

ペルチェ素子から電流を取り出すと熱抵抗が変化する。電力としてエネルギーが取り出されるので電流を流すと熱抵抗が小さくなる。

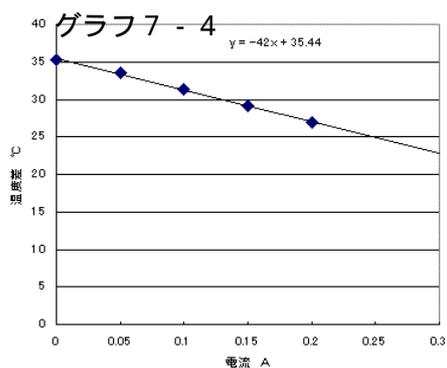
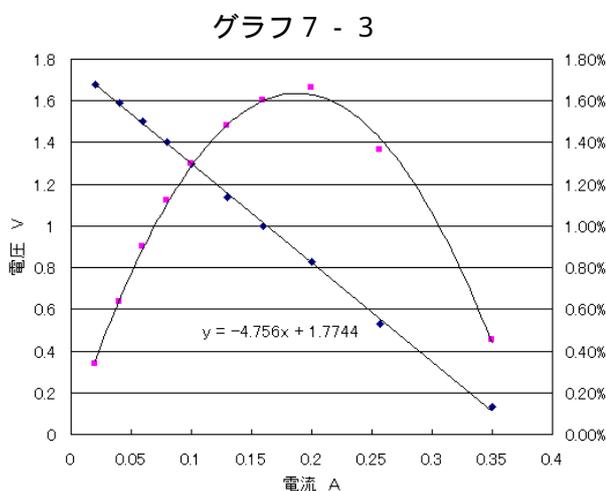
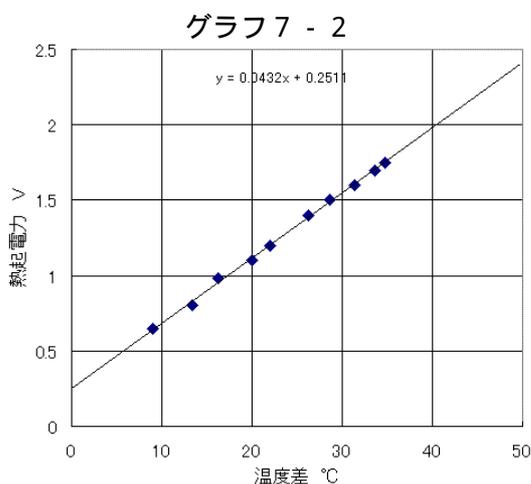
ペルチェ素子を2段重ねにすると、1個の場合の約2倍の効率になった。熱抵抗が2倍になり無駄な熱の通過が少なくなったためである。そこでこの調子で3個4個と重ねると効率が向上するかと考えられるが、太陽熱で加熱し、水道水で冷却する場合を考慮すると、得られる温度差は40～50程度と考えられるので実際の運用条件を考慮すると2段重ねが最も合理的である。

今回利用したペルチェ素子は、T150-85-127である。ペルチェ素子の特性により効率などが

表 7 - 2

型番	Vmax	Imax	Qmax	サイズ
T150-40-127	17.5	4.0	38	39.6 × 39.6 × 4.16
T150-60-127	17.5	6.0	57	39.6 × 39.6 × 4.16
T150-85-127	17.5	8.5	80	39.6 × 39.6 × 3.94

変化するかT150-40-127の特性を測定した。



温度差に対する熱起電力の大きさは同じである。熱抵抗が大きい熱源に接触させた場合、ペルチェ素子に加わる温度差は、T150-40-127の特性は、T150-85-127を2段重ねにした場合と殆ど同じになる。2段重ねの場合1段あたり温度差は半分になるが、電気的に直列なので熱起電力は同じになる。

8. 発電モジュールの製作

これまでの研究と、5.太陽熱発電システムの実証試験の反省をふまえて、より実用的な発電システムを製作した。製作に当たり次の点を考慮した。

1. 冷却モジュールを製作し、簡単に発電システムが構築できるように工夫した。

2. 得られる温度差が40~50 程度と仮定し、ペルチェ素子2段重ねの構造にした。

なお2. に関してはT150-40-127のペルチェ素子を購入すれば1個で間に合う。

水冷モジュールの構造は写真のようで、シリコンシーラントで水漏れを防ぐ方法を取り、冷却部分は2cm×2cmのアルミ柱を利用した。

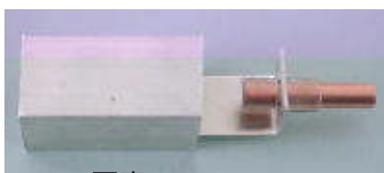


写真 8 - 1



写真 8 - 2



写真 8 - 3

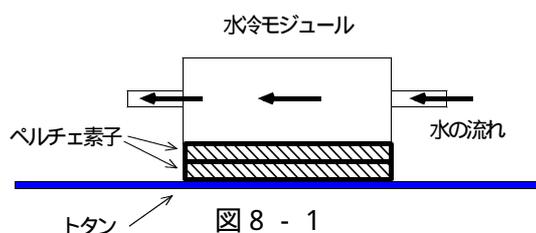


図 8 - 1

ペルチェ素子は冷却モジュールに接着剤で固定する予定であるが、シリコングリスで借り止めした。5.太陽熱発電システムの実証試験ではトタンの内側に取り付けたが、今回はトタンの表面に取り付けるように考えた。この方法のが簡単に施工できると考えた。



写真 8 - 4

水冷モジュールの温度は29

トタンの温度は59

で温度差は30 あった。

熱起電力は約0.7Vであった。

この程度の温度差が得られれば、今までの基礎実験のデータをもとにすれば熱起電力は1.4V程度見込める。しかし、「太陽熱発電システムの実証試験」の結果と同様に全く基礎実験の結果から予測されるデータではない。熱的な接触が不十分ではないの



写真 8 - 5

かとの反省をふまえ、実験装置を分解し問題点を洗い出してみた。その結果次の問題点がわかった。

1. ペルチェ素子の防水加工で側面に塗ったシリコンシーラントの処理が悪く、ペルチェ素子の面に薄くついてしまった。その結果熱的な接触が悪化した。
2. 薄いトタンにシリコングリスの粘着力でペルチェ素子を取り付けた。しかし、トタンが薄いのでゆがみが生じ、ペルチェ素子との間に隙間ができ熱的な接触が悪化した。

そこで、「太陽熱発電システムの実証試験」の考察をふまえ、ペルチェ素子を20cm×20cm×3mmのアルミの板に取り付け、冷却ユニットも確実に固定できる方式にした。

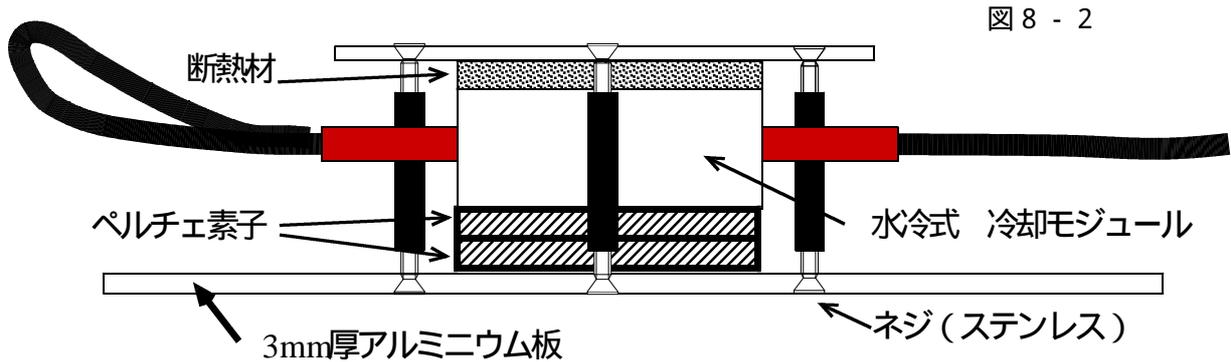
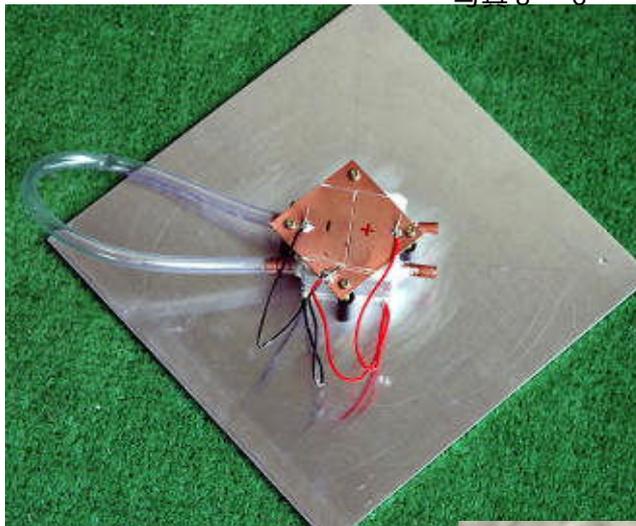


図 8 - 2

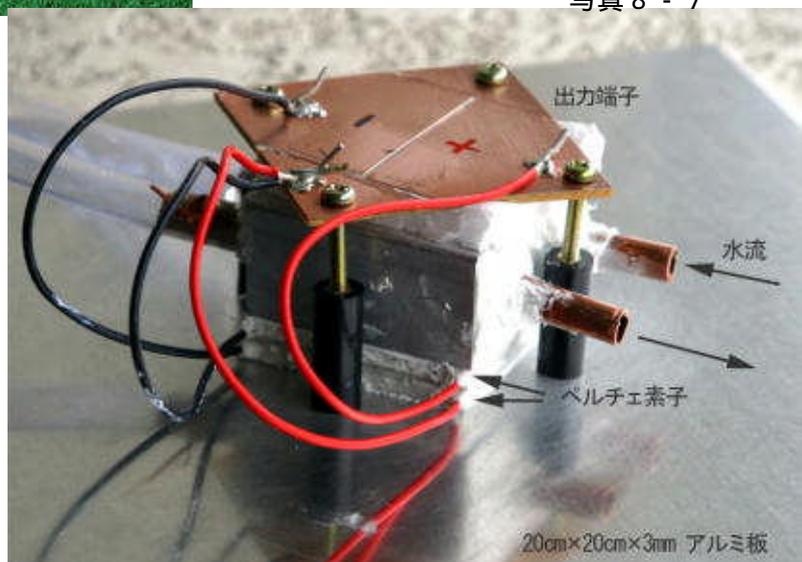
写真 8 - 6



20cm×20cm×3mmのアルミ板に取り付けた理由は、トタン板との熱的接触は、4cm×4cmのペルチェ素子との直接ではうまくできないことが今までの実験の結果でわかったからである。そこで、まずアルミ板とペルチェ素子を十分に接触させ、トタンとの熱的接触は凹凸などの影響で十分にはできないが、接触面積を20cm×20cmと広げることで、熱的接触を稼ぐことを考案した。

写真 8 - 7

アルミ板とペルチェ素子、及び冷却モジュール間にはシリコングリスを薄く均一に塗り、断熱材をスプリングとしてネジで圧着しており、良好な熱的接触が保たれている。冷却ユニットに水を流すだけで0.3Vの熱起電力が発生した。水温と室温の温度差6 で実験結果と見事に一致した。



9. 実験のまとめ

今回の研究を振り返ると次のような事がわかった。

1. 熱起電力は温度差に比例し、T150-85-127のペルチェ素子では温度差20 で約1V発生する。
2. ペルチェ素子の電源としての内部抵抗は2.5 程度である
3. 温度差100 で熱起電力5V程度(グラフ(4)-1より)、内部抵抗2.5 とすれば最大出力2.5W程度と見積もられるが、実験式より予想される最大電力は1W程度(グラフ(4)-3)である。
4. ペルチェ素子による温度差発電では、100 の温度差が得られれば、1W当たり2000円程度のコスト。但し実装するとこれ以下の費用対効果になる。
5. 温度差40 程度でのエネルギー変換効率は、T150-85-127のペルチェ素子を2段重ねで約2%程度である。
6. 実装状態では、ペルチェ素子を重ねて発電させると効率が上がる。最大温度差を100 とすると5段重ねが実現できる(各素子当たり20),この場合の効率は5%程度となる。素子の絶対定格は最高温度が150 ,この場合7段重ねが可能ならば効率は7%程度と見積もられるが、条件が厳しく太陽電池の効率には及ばない。
7. 温度差が大きくなれば実質的に効率が向上する(6.より)。
8. ペルチェ素子の熱抵抗が効率を下げる原因と、とらえることができる。
9. T150-85-127のペルチェ素子の熱抵抗は無負荷で2 /W程度である。負荷を短絡させるとおおよそ1 /Wに下がる。
10. T150-40-127のペルチェ素子は(4Aで38W吸熱タイプ)はT150-85-127の約半分の冷却能力のペルチェ素子であるが、熱抵抗は2倍の4 /W程度である。実装状態での温度差発電に関しては熱抵抗が2倍であるためT150-85-127 2段重ねの性能と同じ性能が得られる。
11. トタン屋根に取り付けた発電モジュール(2段重ね)の性能は、温度差が30 程度得られるので、熱起電力1.4V(無負荷)、出力電力0.1W(0.7V出力)程度の発電性能である。
12. 発電モジュールは20cm×20cm程度のアルミ板に圧着し、トタン屋根との接触面積を大きくする必要がある。
13. 発電モジュールを1m×1mに上記の間隔で貼り付けると25個の発電モジュールが取り付けられるが、このとき出力が約4W、素子代が5万円程度となる。(T150-40-127 1枚貼り付け)
14. 小型太陽電池のコストは1W当たり3000円程度である。大型になると割安になる。実勢価格を調べると、アモルファスシリコンタイプで64W出力が六万八千円程度であり、太陽電池の方がかなりやすい。

10. 太陽熱発電システムの可能性

ゼーベック効果を利用した太陽熱発電システムの可能性を探ってきた。しかし太陽電池と比較すると必ずしもメリットのある方法ではない事がわかる。しかし、全く無意味であるのかと言えぼそんなことはないと考えている。

確かに熱源を太陽光に求めると、太陽電池にはかなわないことがわかるが、しかし、30 の温度差で0.1W程度のエネルギーを取り出せる性能がもう少し向上すれば、実用的な装置として成り立つと考えられる。

近年の夏の暑さは異常である。ヒートアイランド現象も加わって数年後には最高気温が40 に達するのではないかと報道されている。この厄介者の熱を使って発電できるのではないかと考えている。

非常用ロウソク発電機

ところで研究の成果と言うほどではないが、ロウソクの熱で発電しラジオを鳴らす熱発電装置の製作に成功した。

平成11年度物づくり体験教室で行った実験(図10-1)では氷を使い、モーターが回ったり豆電球が光ったと聞いた。(この実験結果が今回の研究のスタートとなった)

氷を使わなければ温度差が得られないので、氷なしでは無理ではないかと思われていた。しかし、ペルチェ素子の熱抵抗を考慮すると氷なしで、一般的な放熱板でも発電できるはずだと考え試作してみた。

図10-2の様な構造の熱発電機とし、ペルチェ素子T150-40-127を2枚重ねで発電する。2枚重ねのペルチェ素子の熱抵抗は8 /W, てもちの放熱板の熱抵抗を1 /Wと仮においてどれだけの温度差が出来るか計算してみた。炎側にはカップの中に水を貯え最高で100 の温度に押さえ素子の破損を防ぐ構造とした。

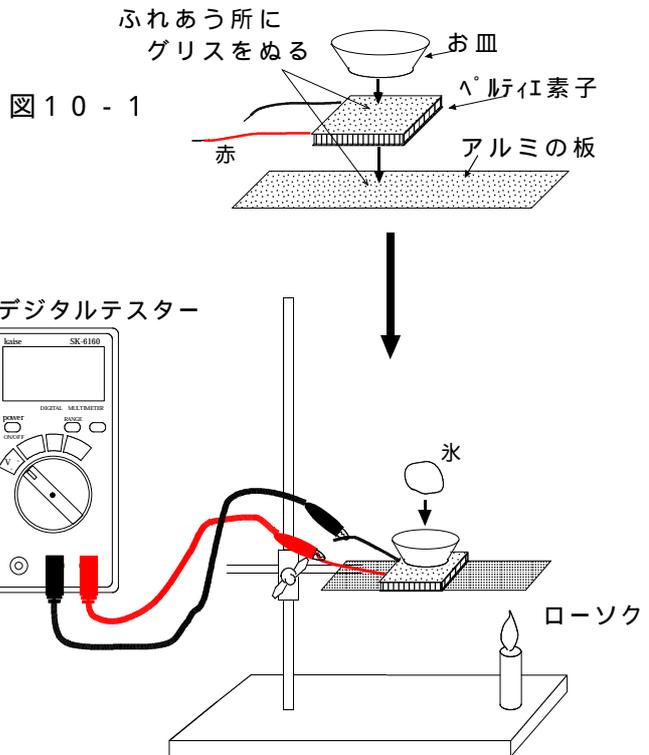
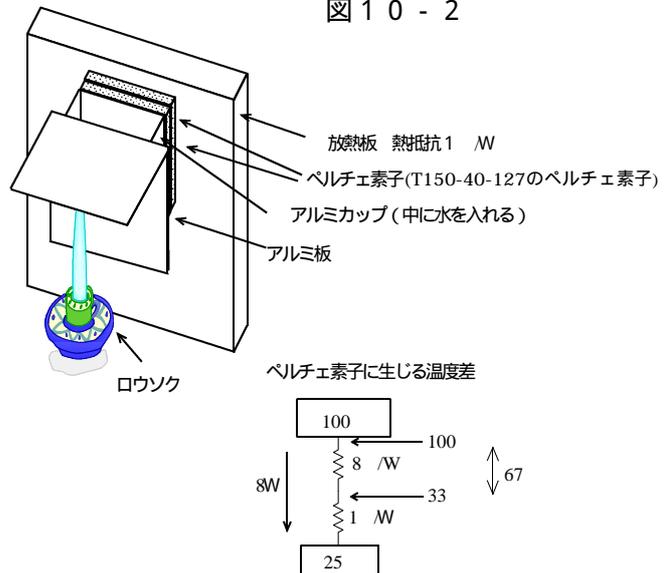


図10-2



気温を25 とすると、流れる熱は約8W、従ってペルチェ素子には67 程度の温度差が生じ3V 程度の熱起電力が発生すると期待される。

ろうソクの炎で発電するシステム、たとえば、台風がきて停電発生、ろうソクの炎での明かり取り、そして熱発電による電気でラジオが鳴る。一石二鳥の装置となる。コジェネレーションシステムと言ってもいいのではないかと思ったりする。

写真 1 0 - 1

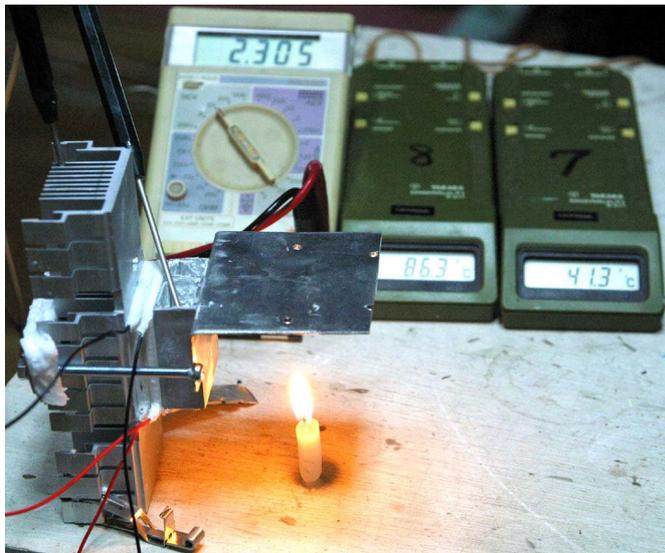


写真 1 0 - 1 が試作したろうソク発電機である。高温側の温度が86.3 ，低温側が41.3 ，気温25.1 であった。利用した放熱板の熱抵抗が1 /Wよりかなり大きかったために、放熱板の温度が計算より上がったが、熱起電力は2.3Vであった。熱抵抗の小さな放熱板を利用すれば熱起電力は3Vは得られたと思う。これだけの出力が得られれば十分にラジオは動作するはずである。

この試作品より放熱板の熱抵抗を逆算して約3 /Wとなった。

$$\text{ペルチェ素子の温度差} = 86.3 - 41.3 = 45$$

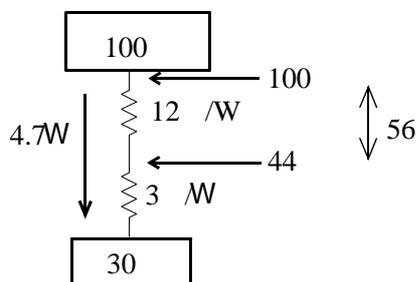
$$\text{ペルチェ素子を流れる熱量} = 45 \div 8 = 5.6\text{W}$$

$$\text{放熱板の温度上昇} = 41.3 - 25.1 = 16.2$$

$$\text{放熱板の熱抵抗} = 16.2 \div 5.6 = 2.9 \text{ /W}$$

燃料電池？

放熱板を多くすれば3Vは出る。しかし発電機が大きくなりすぎるので、ペルチェ素子の熱抵抗を大きくすれば大きな温度差が得られるはずである。そこで3枚重ねにして実験した。



ペルチェ素子の熱抵抗を12 /W、放熱板の熱抵抗を3 /W

とし、気温を30 として計算してみると、

$$\text{流れる熱量 } Q \text{ は } Q = (100 - 30) \div (12 + 3) = 4.7\text{W}$$

$$\text{ペルチェ素子の温度差} = 12 \times 4.7 = 56$$

$$\text{放熱板の温度} = 30 + 3 \times 4.7 = 44$$

と計算できる。温度差が56 程度あれば約3Vの電圧が発生するはずである。

そこで3段重ねのロウソク発電機を試作してみた。

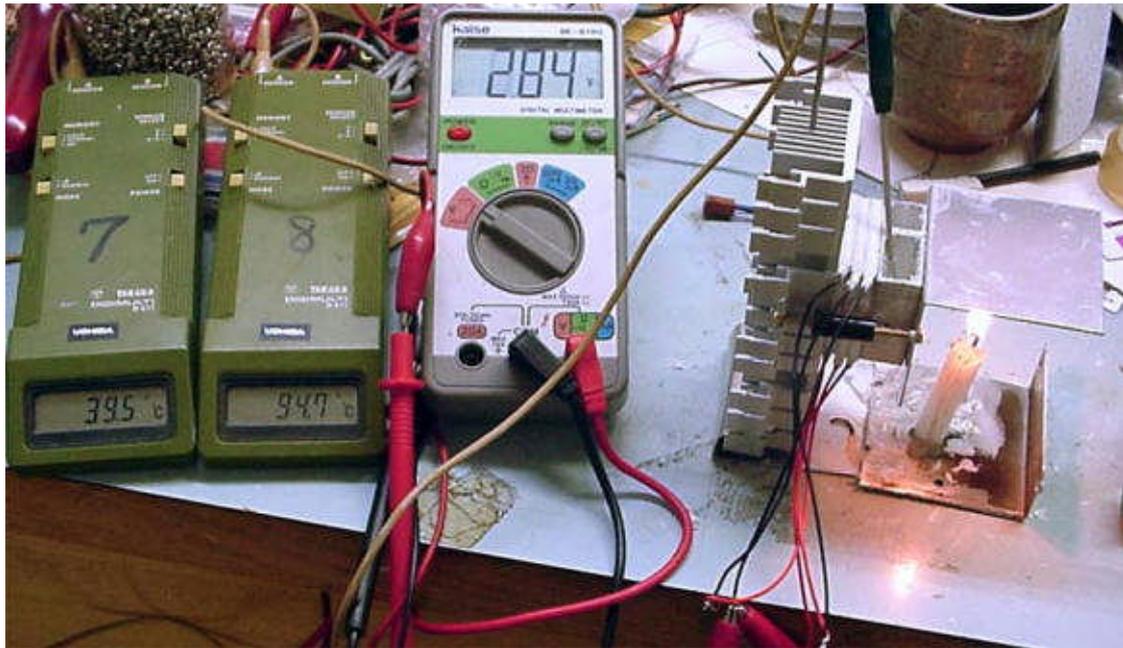


写真10-2

写真10-2の様に、気温30℃、温度差が55℃、熱起電力が2.84V得られた。この状態で本校の理系クラスで製作したラジオの電源としたら見事に動作した。

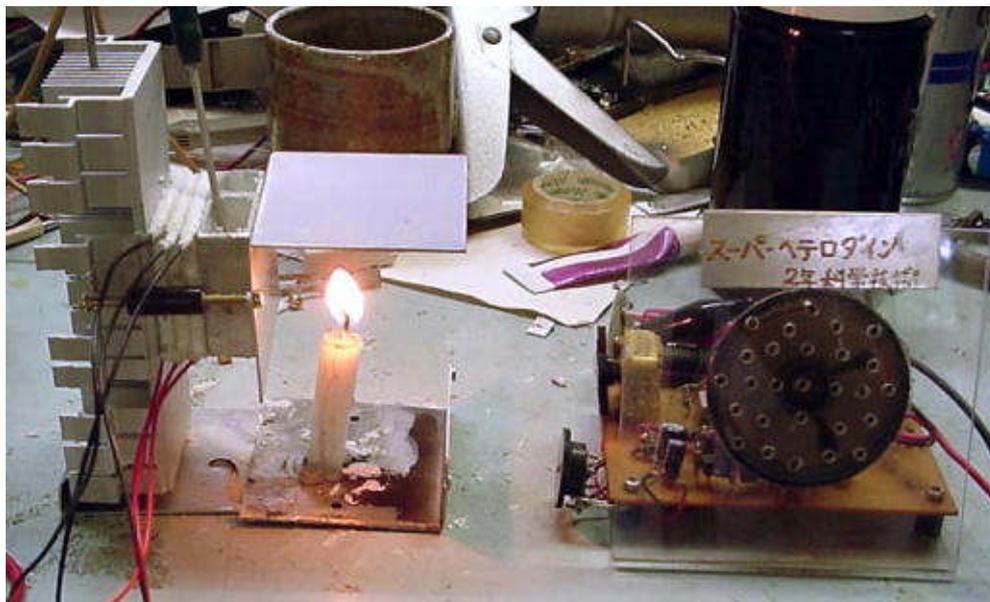


写真10-3

ロウソクで加熱し発電できるのであるから、ホッカイロなどでも発電できる。小さなペルチェ素子と放熱板を組み合わせると電池の様な形の発電機を作り、放熱をどうするか検討すれば、まるで燃料電池のようだと感激した！

懐炉で体を温め、その温度差でラジオを聴ければ小さなコ・ジェネレーション・システムではないかとも思った！

1 1 . 研究のまとめ

今回の研究で、ペルチェ素子を利用して高温熱源として太陽光で暖められたトタン屋根を、低温側として水冷方式を採用した太陽熱発電システムの試験を行い可能性を検討した。研究の結果、次の点がわかった。

熱抵抗

ペルチェ素子の温度差に対してどれだけの熱起電力が発生するかの予備実験などでなかなか再現性のある値が出ず大変苦労した。その原因は良好な熱的接触を得ることが技術的に難しいことに起因していた。熱抵抗という物理量を持ち出すと、接触によって熱抵抗が大きくなり熱がなかなか伝わらなくなっていたことによる。

さらにペルチェ素子自体の熱抵抗がエネルギー変換効率に影響することがわかった。熱を供給する側は熱容量だけを考えれば、熱が流れ出れば温度が下がることは容易に理解できる。しかし常に加熱され熱量が供給されていれば温度は変化しないように錯覚する。このような場合、熱源の熱抵抗という立場で考察すると大変よく理解できることがわかった。

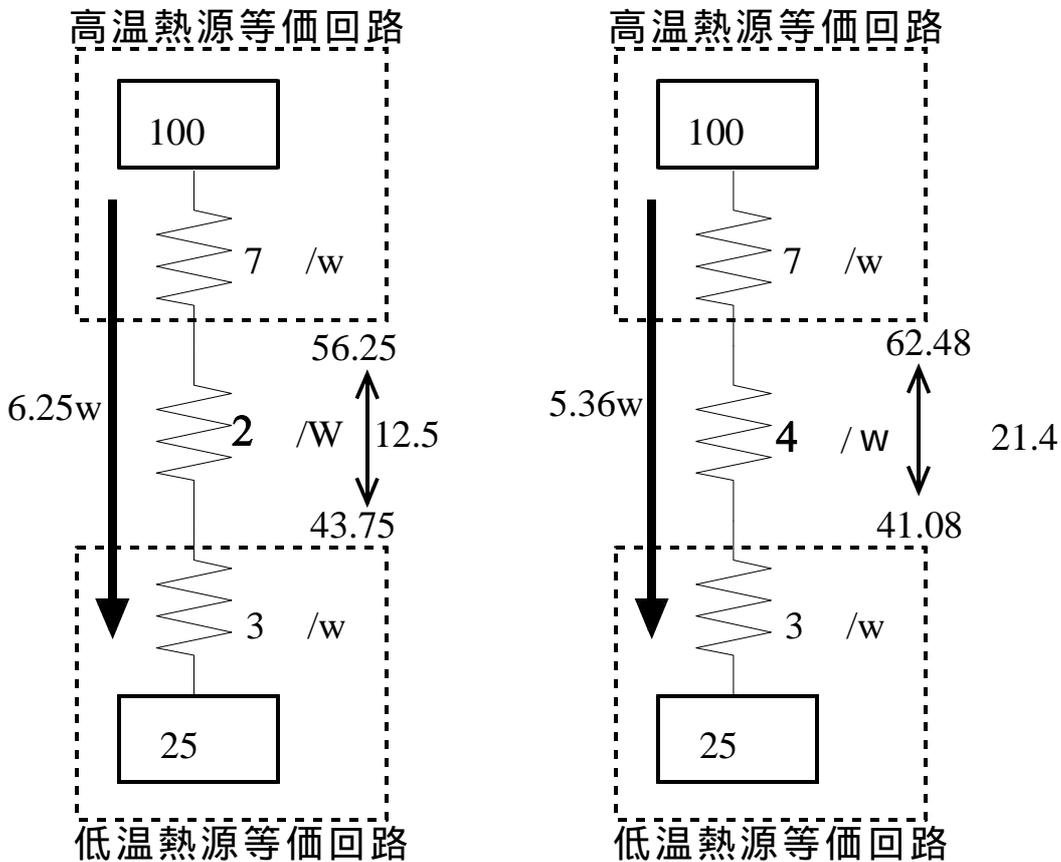


図 1 1 - 1

図11-1の点線で囲まれた部分が熱源を意味する。一定不変な温度と熱源に熱抵抗が直列に接続された等価回路と見なす。このような熱源に熱抵抗が2 /W, および4 /Wのペルチェ素子を接続すると, ペルチェ素子両面の温度差は12.5 対21.4 となり, この場合2倍近い温度差となる。

ペルチェ素子の効率の測定で利用した熱源は, かなり熱抵抗が大きい熱源を利用したので, 素子の熱抵抗が大きくなれば温度差が広がり効率が向上する結果になったと考えられる。このように, 熱源とペルチェ素子の熱抵抗の関係が効率に大きく関係することがわかった。

ペルチェ素子を重ねることで効率が向上するのは素子の熱抵抗が比例して大きくなるためであり, 2個重ねれば1個の時の2倍の温度差になり, 熱起電力も2倍になるためである。しかし, 熱源の熱抵抗が十分に小さい場合, および熱源自体の温度差が小さい場合はこの限りでないことは言うまでもない。

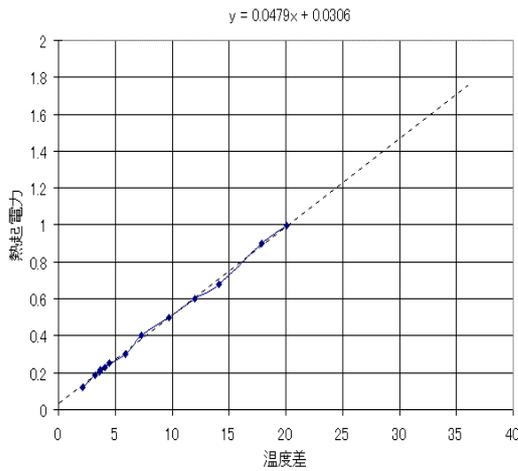
トタン屋根に太陽熱発電ユニットを貼り付ける場合を考えると, 温度差が最大で40 程度で, 熱源の熱抵抗も大きくなるので, ペルチェ素子を2段重ねにした構成がベターだと考えている。なお, 具体的な熱源の熱抵抗の測定は今後の課題とする。

非常用口ウソク発電機でペルチェ素子を3段重ねにした。勿論ペルチェ素子の熱抵抗を大きくする為である。廃熱は放熱版を通して大気中に捨てる。この放熱版は熱抵抗が示されて市販されている。ペルチェ素子の熱抵抗が十分に大きくなければ, 放熱版の温度ばかり上昇し, ペルチェ素子両端の温度差など生じなくなってしまい発電できなくなる。この状況がトタン屋根と太陽熱発電モジュールの間で起きるとほとんど電力は取り出せなくなる。

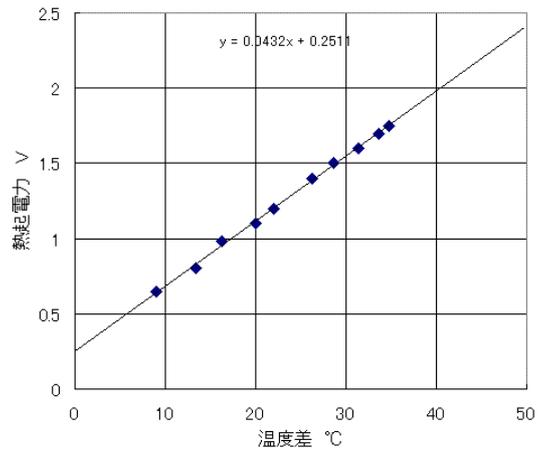
熱発電の場合, いかに効率よく熱を取り出すかがポイントになってくる。

ペルチェ素子の特性

グラフ11-1 T150-85-127



グラフ11-2 T150-40-127



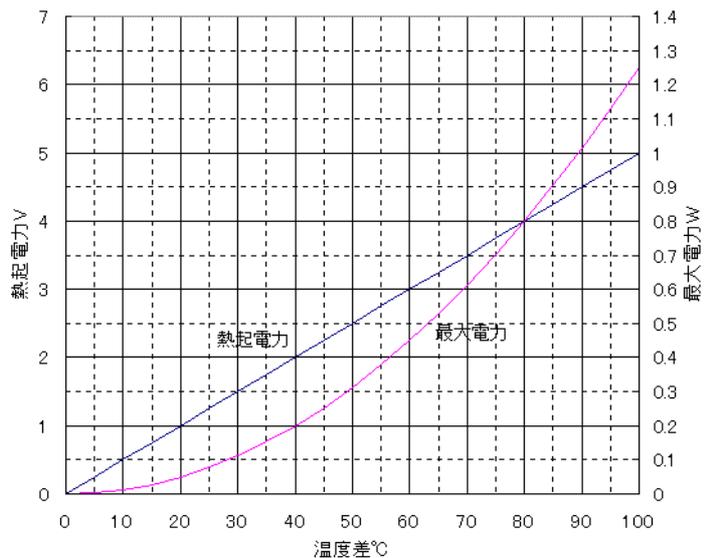
上の2つのグラフは T150-85-127 T150-40-127 それぞれのペルチェ素子の温度差対熱起電力のグラフである。右のグラフは原点が上方にシフトしたが、両方のグラフとも20 で熱起電力1Vの特性を示している。電池と考えたときペルチェ素子：T150-85-127は、

1. 熱起電力はほぼ温度差に比例する。20 で1Vの熱起電力である。
2. ペルチェ素子の内部抵抗は電流によらずほぼ一定である。2.5 程度である。
T150-85-127は2.5 T150-40-127は5
T150-85-127の直流抵抗をテスターで測定すると2.1 である。
3. 一般の電池と同じように、最大電力は開放電圧が半分にドロップした電流値で得られる。

と考えよいことがわかった。最大電力で取り出す電子回路の開発も必要である。今後の課題とする。

ペルチェ素子(T150-85-127)は内部抵抗2.5 の電池と等価である。2段重ねでは内部抵抗5 の電池と同じとして温度差に対する熱起電力、最大出力電力のグラフを描いた(11-3)。熱起電力は温度差に比例し、内部抵抗はほぼ一定と考えられるので。

グラフ11-3 内部抵抗5Ωのペルチェ素子の理論値



4. 最大出力電力は温度差の二乗に比例する。さらに、この素子から取り出せる最大電力は温度差の最大値を素子が壊れる限界を100 とすれば、1W程度である。

太陽熱発電モジュール

「太陽熱で温水が得られると同時に発電する。」が目標であった。太陽熱発電モジュールの効率は期待していたよりはかなり低いことがわかった。しかし実際の発電モジュールの出力はどれだけで、水はどの程度温められるのか図の方法で測定した。

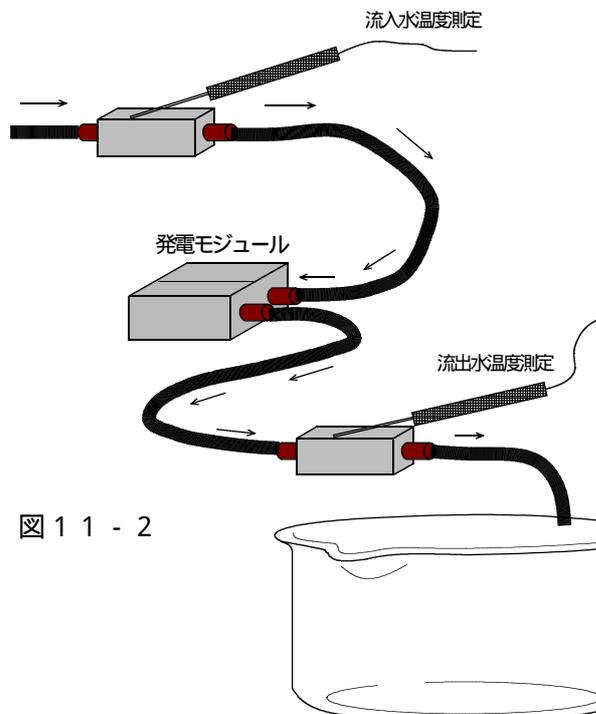


図 1 1 - 2

表 1 1 - 1

表面温度	56.0
流入水温度	27.0
流出水温度	28.5
流量 cm^3/s	8.53
熱起電力 V	1.26
出力電流 A	0.27

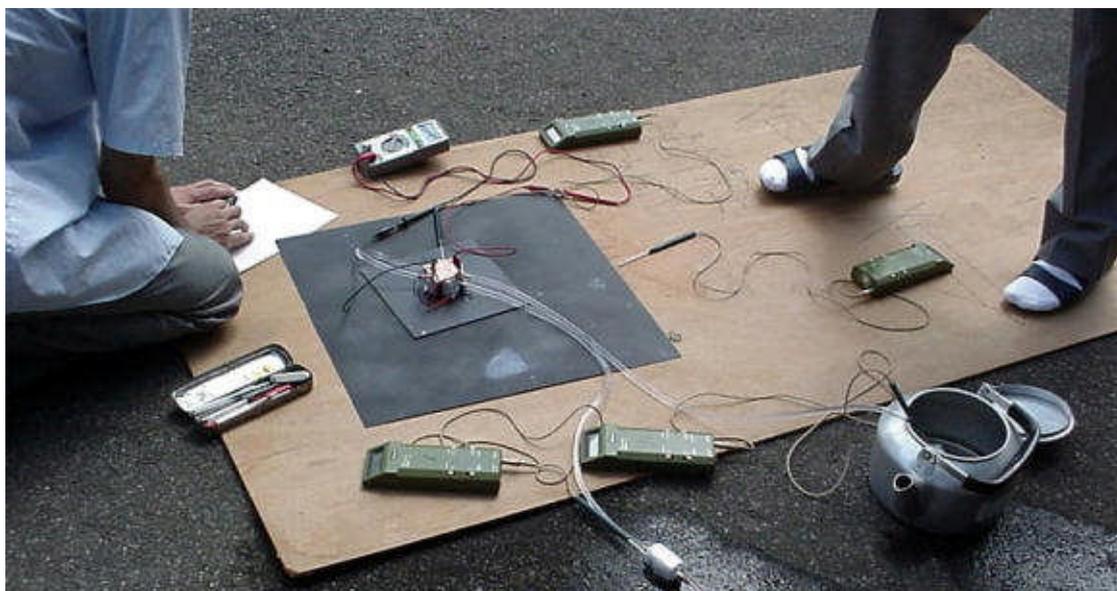
なお 熱起電力は無負荷時の値

出力電流は短絡時。短絡時水温変化は

27.0 (流入) 28.6 (流出)

となった。また写真のように発電モジュールの下に黒のトタンをひいたが、トタンを取り除いても表面温度は1 程度しか変化が無く、20cm×20cmのアルミ板に降り注いだ太陽光の熱量だけで動作していたと考えると良いと考えられる。水の流量は1 分間、ヤカンに水をためて水量を測定した。

写真 1 1 - 1



ペルチェ素子両端の温度差は t は

$$t = 56.0 - (28.5 + 27.0) \div 2 = 28.3$$

グラフ11-1より、 28°C での熱起電力は1.39V であるが、1.26Vとほぼ一致している。

ペルチェ素子の内部抵抗は2個直列で5 Ω である。熱起電力1.26Vであり、出力を短絡すれば、流れる電流 I は

$$I = 1.26 \div 5 = 0.252 \text{ A}$$

で測定値とほぼ一致する。

最大出力は外部に5 Ω の負荷抵抗をつないだ場合で、最大電力 W は

$$W = 5 \times (1.26 \div 10)^2 = 0.08 \text{ W}$$

となり、ほぼ0.1Wの出力となる。

水温の変化は 27.0°C 28.5°C と 1.5°C 上昇している。しかし、水温の測定ポイントが写真11-1のように60 cm ほどに暖まったトタンの上をホースをはわせたので、ホースでの加熱の割合がほとんどであったと思う。その理由は、ペルチェ素子の出力を開放と短絡させて水温の変化を調べると短絡させた場合は開放の時より0.1 $^\circ\text{C}$ 水温が上昇した。(温度計の分解能は0.1 $^\circ\text{C}$)

ペルチェ素子2段重ねでの熱抵抗は無負荷で3.7 $^\circ\text{C}/\text{W}$ 、短絡で2.7 $^\circ\text{C}/\text{W}$ である。無負荷でのペルチェ素子を通過する熱量 Q_0 、出力短絡時に通過する熱量 Q_s は

$$Q_0 = 28.3 \div 3.7 = 7.65 \text{ W} \quad Q_s = 28.3 \div 2.7 = 10.48 \text{ W}$$

従って $Q = Q_s - Q_0 = 10.48 - 7.65 = 2.83 \text{ W}$

水温の変化を見ると、無負荷時と出力短絡時に水温の温度差が0.1 $^\circ\text{C}$ 上昇し、水量は $8.53 \text{ m}^3/\text{s}$ であるから $Q = 4.2 \times 8.53 \times 0.1 = 3.58 \text{ J/s} = 3.58 \text{ W}$

とほぼ一致している。従って発電モジュールの冷却モジュール部で暖められた水は殆どないことになる。なお温度計の分解能が0.1 $^\circ\text{C}$ なので誤差は大きい。

概算で発電モジュールを水が通過すると、 Q_0 、つまり約8Wの熱量が水に与えられる。

以上より、今回製作した太陽熱発電システムの性能は以下ようになる。

太陽熱発電システムの性能	
電気出力	0.1W
熱出力	8W

測定条件 気温 32°C 、真夏の快晴時

今回の装置では実用性はあまりないと言える。改良が必要である。

熱抵抗の問題から20cm×20cm×3mmのアルミの板にペルチェ素子を圧着させた。アルミ板が太陽により加熱される熱だけで温度が60℃近くになる。高温側の熱抵抗が小さいと予想される。この場合、ペルチェ素子一段で発電させると、内部抵抗2.5Ωの電源となり温度差も2枚重ねと同じであると仮定すると、**電気出力** 0.2W となることが予想できる。また熱抵抗は1.8 / Wに減るため、**熱出力** 16W になる。

高効率化するには

ペルチェ素子の熱抵抗と電池として動作する場合の内部抵抗は比例関係にある。内部抵抗が半分になれば熱抵抗も半分になる。電力を多く取り出すためには、内部抵抗が小さい電源である必要がある。しかし、熱抵抗が小さくなると無負荷の状態でも熱の流れが多くなり効率は悪化する。高効率化するためには、無負荷での熱抵抗が大きく、電池としての内部抵抗が小さいペルチェ素子が開発される必要がある。