

第1回 HAKKO 熱の実験コンテスト

「毛管現象を使って発電し，その電気で物を浮遊させよう！！」

名古屋大学工学部機械・航空工学科機械システムコース3年 長野研究室所属

○西保裕司，高島晃，宮地耕平，横山翔平

1. 背景・目的

近年，地球温暖化やエネルギー不足が謳われている中で，我々は一刻でも早く環境に配慮したエネルギー対策を取らねばならない．そこで，今回の研究課題として，現在熱エネルギー輸送技術や冷却技術など幅広い分野の熱制御において利用が期待されている，“ループヒートパイプ (Loop Heat Pipe, 以降 LHP)” に注目した．今回は，この LHP を単なる熱輸送システムとして用いるのではなく，その熱輸送プロセスの際に生じる圧力を利用して電気を生み出すという全く新しい発電システムを開発し，その電気を使って何らかの物体を浮遊させることを目標とする．

2. LHP・毛細管力発電の仕組みおよび使用原理

毛細管力とは，メニスカスが形成される界面において表面張力によって働く力である．その力を利用して受熱部で受け取った熱を電力を使わずに放熱部まで受動的に輸送する熱機関のことを LHP と呼ぶ．今回は LHP のサイクルの途中にタービンなどを設置することでモータを回し発電するという新しい原理を考えた．これを毛細管力発電 (Capillary Power Generator, 以降 CPG) と名付ける．装置の概略図を Fig.1 に示す．

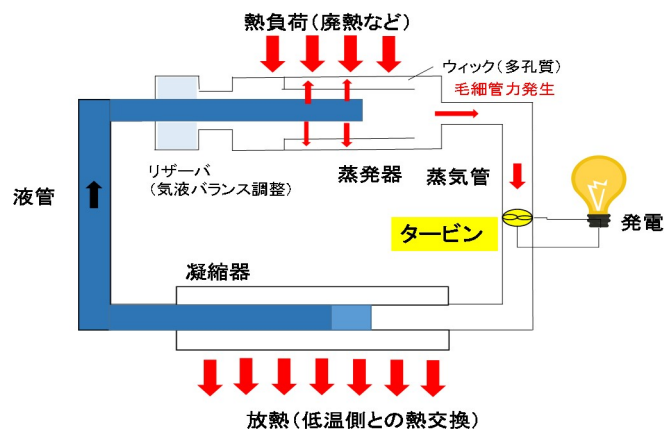


Fig.1 LHP および CPG の概念図

この熱機関は主に蒸発器，輸送管，凝縮器，発電機により構成されており，内部には液相または気相の状態となっている作動流体によって満たされている．CPG は以下のサイクルによって発電する．

- ①太陽熱や廃熱などの熱源が蒸発器に加えられ，作動流体が蒸発する．
- ②蒸気は蒸発器から蒸気管へと移動する．
- ③蒸気管を通る際に蒸気管内のタービンを回し発電する．
- ④凝縮器に達した蒸気は凝縮器内で放熱し液体となる．
- ⑤作動流体は液管を通り再び蒸発器に戻る．

3. 毛細管力発電を利用した浮遊物体の例

我々のチームは新しい発電方法である CPG 実現し，その原理を利用して，太陽熱や廃熱など本来使われない熱源を利用した未来の乗り物を作ろうと考えた．その可能性を検証するため，今回 CPG を利用した小型のホバーカーを製作しようと考えた．Fig.2 にホバーカーの概略図を示す．

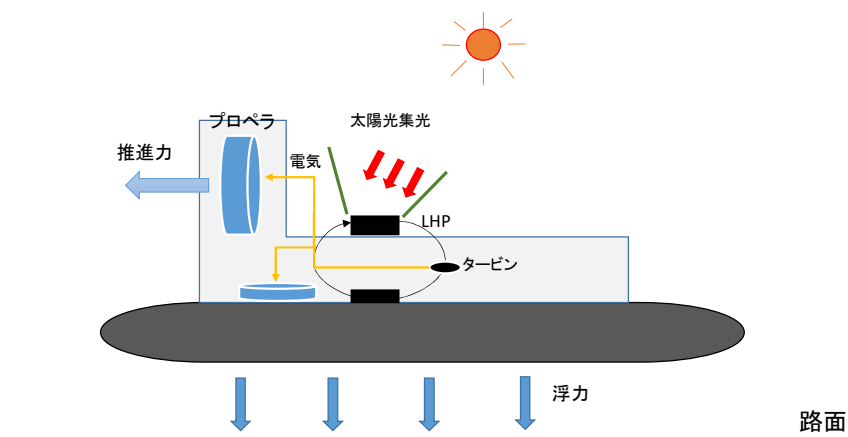


Fig.2 CPG によるホバーカー

CPG を稼働させるための熱源としては太陽熱に注目した．太陽光を集光し，その熱によって CPG を稼働させ，CPG によって生じた電気によりモータを回し，ホバーカーを浮かせ，走らせるという仕組みである．

4. 研究方針

本提案では CPG を利用したホバーカーを実現するために、以下の手順で研究を進めるととした。

(1). CPG 実証

新しい発電原理である CPG は実際に実現可能なのか、発電機の組み込み方法や作動流体、管径などを具体的に考え、製作および実証実験を行う。

(2). CPG を用いたホバーカーの開発

CPG を動力源としたホバーカーを実現するため、熱源、作動流体の供給方法、CPG の材質などを決定し、実際に CPG によって駆動する小型ホバーカーを製作する。

5. 発電機の組み込み方法

(1). 発電機の必要条件

・密閉性

LHP は閉鎖系で駆動するシステムであるため、発電機を組み込むために穴や隙間を作るうまく駆動しなくなることが考えられる。よって発電機を組み込む際には密閉性を保ったまま駆動することが求められる。

・低圧駆動

LHP によって得られる毛細管力 P_{cap} は次の式で表される。

$$P_{cap} = \frac{2\sigma}{r} \cos \theta \quad \dots\dots (1)$$

σ : 液体の表面張力 [N/m]

θ : 接触角 [°]

r : 多孔体の細孔半径 [m]

過去に研究室において製作した LHP を使用し、作動流体をアセトンとすると仮定すると、式(1)より毛細管力 P_{cap} は 0.039 MPa と計算される。このように得られる毛細管力はかなり小さいものである。そのためで組み込まれる発電機も低圧力で駆動することが求められる。

(2). 液相による性能実験

【目的】

必要条件を満たすような発電機として、市販の小型水力発電機に注目し2種類の異なる発電機を取り寄せた。水力発電機は Fig.3 のようにプロペラ部、モータ部、磁石部より構成されており、プロペラの回転を磁石によりモータに伝えるという仕組みで密閉性を保ちつつ発電していた。我々はこれらの発電機を直接 LHP の流路に組み

込むことを考え、これらの発電機がどれほどの性能を持ち、LHP のような低圧力下でも作動することができるのか、また、二つの発電機のうちどちらが高性能なのかを検証するために次のような実験を行った。



Fig.3 小型水力発電機 1



Fig.4 小型水力発電機 2

[実験方法]

水道から出る水をホースを用いて発電機に通し、そこで取り出せる電圧を測定した。発電機を通った水は 500ml ビーカーに入れ、ビーカーがいっぱいになるまでの時間を測定し、質量流量を計算によって求める。

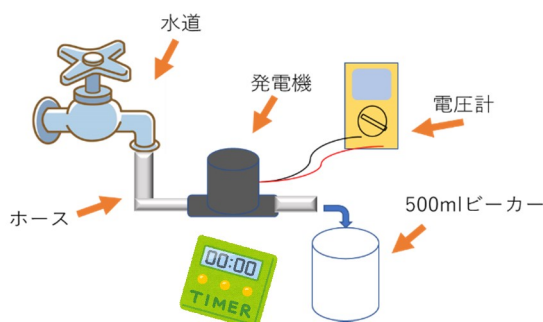


Fig.5 実験の概略図



Fig.6 実験の様子

[結果・考察]

二つの発電機を発電機 1，発電機 2 として実験結果の表とグラフを Table.1, 2, Fig.7 に示す。

Table.1 発電機 1 での実験結果

	質量流量[kg/s]	出力電圧[V]
1	0.022	1.55
2	0.023	1.73
3	0.023	1.90
4	0.030	4.00
5	0.035	5.00
6	0.038	5.30
7	0.047	7.30
8	0.048	8.70
9	0.056	10.10
10	0.116	12.00
11	0.158	13.10

Table.2 発電機 2 での実験結果

	質量流量[kg/s]	出力電圧[V]
1	0.040	1.90
2	0.055	3.10
3	0.064	7.00
4	0.076	9.10
5	0.087	11.90
6	0.100	11.90
7	0.148	11.92

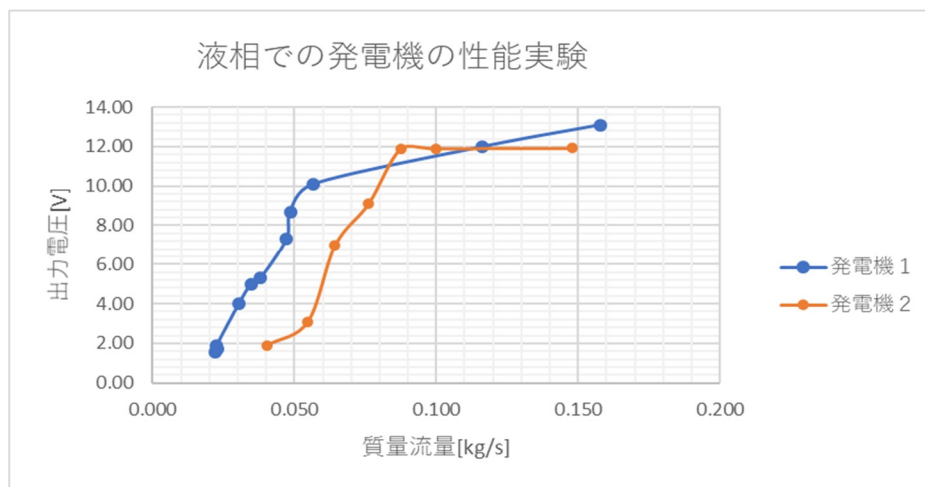


Fig.7 液相での性能実験

発電機 1 のほうが発電機 2 と比べほとんどの質量流量で高い電圧を取り出すことができた。また、少ない質量流量でも電圧を取り出すことができた。よって液相では発電機 1 のほうが性能の高い発電機と言える。しかし、気相で運用する際に異なった性能を示す可能性があるため、気相での性能実験も必要であると考えた。

(3). 気相での性能実験

[目的]

気相において、発電機が LHP のような低圧力下でも作動することができるのか。また、二つの発電機のうちどちらが高性能なのかを検証するために次のような実験を行った。

[実験方法]

作動流体として窒素を用いる。窒素タンクから配管を用いて発電機に窒素を通し、窒素の圧力を上げていき、その時に得られる出力電圧を記録した。回りはじめの圧力および最低駆動圧力を知るために、窒素の圧力は発電機が出力限界に達するまで上げていき、そこから発電機が止まるまで下げていった。

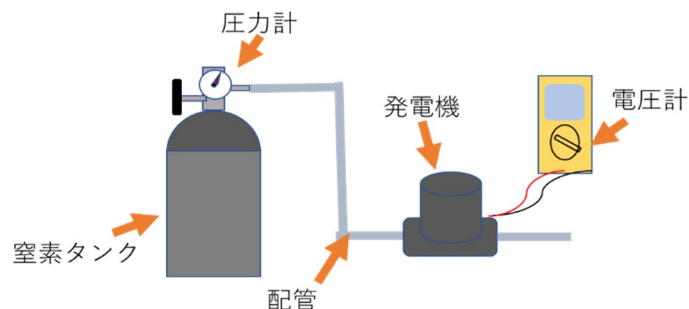


Fig.8 実験の概念図



Fig.9 実験装置

[結果・考察]

実験の結果を表とグラフにして Table.3, 4 , Fig.10 に示す. 発電機の回りはじめの圧力については赤で示した.

Table.3 発電機 1 での実験結果

	圧力[MPa]	出力電圧[V]
1	0.10	0.0
2	0.20	0.0
3	0.24	13.1
4	0.26	14.2
5	0.28	14.2
6	0.22	12.0
7	0.20	10.6
8	0.18	9.3
9	0.16	8.0
10	0.14	5.0
11	0.12	0.0

Table.4 発電機 2 での実験結果

	圧力[MPa]	出力電圧[V]
1	0.10	0.00
2	0.20	0.00
3	0.22	11.92
4	0.24	11.92
5	0.20	11.92
6	0.18	11.92
7	0.16	10.7
8	0.14	5.4
9	0.12	0.0

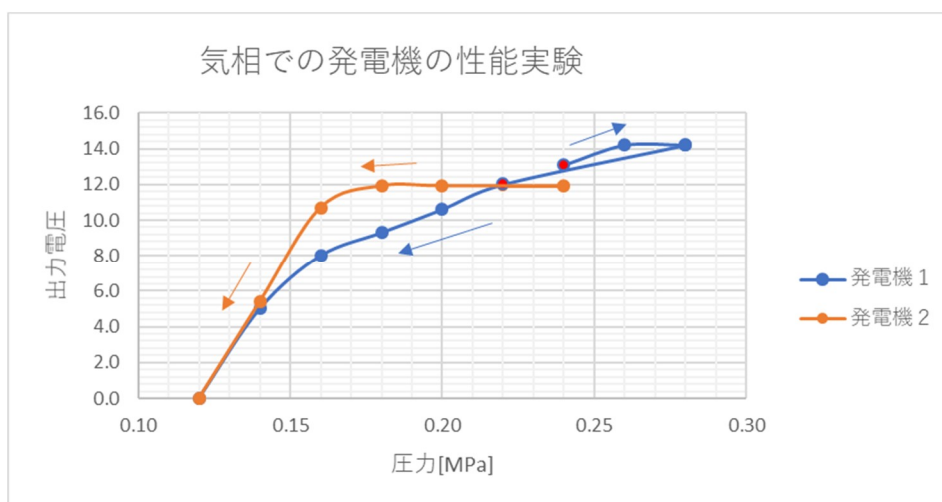


Fig.10 液相での性能実験

実験結果より気相においても発電機1の方が発電機2より高性能であった。低圧力における発電についてはほぼ同じといえる。発電機の回りはじめの圧力はそれぞれ0.24MPa, 0.22MPaであり、いずれも式で計算した毛細管力(0.039MPa)よりも大幅に大きい。そのため、このままLHPに発電機を組み込んでも駆動することが出来ないと考えられる。

(4). モータの選定実験

[目的]

前節の実験より小型水力発電機の発電に必要な圧力を毛細管力によって生み出せないことがわかった。そこで使用する発電機をより高性能な発電機1とし、組み込むモータを低圧で駆動するものに改良することでLHPに組み込めるのではないかと考え、モータの選定実験を行った。

[実験方法]

実験装置は前節と同じものを使い、発電機1に取り付けるモータを変え前節と同様の手順で実験を行った。

実験に使用したモータはFig.11に示す3つモータである。ただし、モータ1は元々発電機に取り付けられていたモータである。

	モータ	直径[mm]
①		38.1
②		24.3
③		4.0

Fig.11 実験に使用したモータ

[結果・考察]

モータ1, モータ2は発電機に組み込み発電することが出来たがモータ3は軸の径が小さすぎて発電機1に組み込むことが出来なかった。モータ1, モータ2の結果をTable.5, 6, Fig.12に示す。

Table.5 モータ1での実験結果

	圧力[MPa]	出力電圧[V]
1	0.10	0.0
2	0.20	0.0
3	0.24	13.1
4	0.26	14.2
5	0.28	14.2
6	0.22	12.0
7	0.20	10.6
8	0.18	9.3
9	0.16	8.0
10	0.14	5.0
11	0.12	0.0

Table.6 モータ2での実験結果

	圧力[MPa]	出力電圧[V]
1	0.10	0.0
2	0.12	3.2
3	0.14	4.0
4	0.16	4.3
5	0.18	5.5
6	0.16	4.7
7	0.14	4.4
8	0.12	3.2
9	0.10	2.6
10	0.07	1.4
11	0.05	0.0

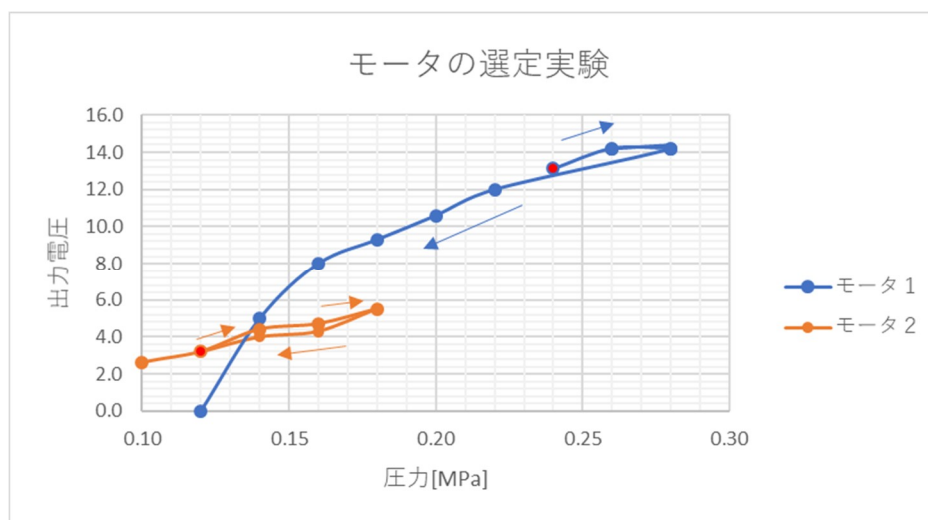


Fig.12 モータの選定実験

実験の結果よりモータ 1, モータ 2 ともに毛細管力で回るほど低圧力で発電せず, モータ 3 は組み込むことが出来ないということが分かった. このことから市販の水力発電機を組み込むという発想から考え直す必要があることが明らかとなった.

6. 発電機の設計実験

前章までの実験結果より, 小型水力発電機を直接 LHP に組み込むことは不可能であると分かった. そこで LHP 内に組み込む発電機構を自作することにした. 前章では小型水力発電機を組み込む前提であったため, 配管の径などは固定されていた. 今回, 新しく発電機構を製作するため, 使用するモータ, 配管の管径, 作動流体, 負荷熱量はどのようなものが適切であるかを調べるため次のような実験を行った.

(1). モータの決定

【目的】

前章において, 使用したモータのうちモータ 1, モータ 2 に関しては発電機に組み込んだ際の必要圧力が毛細管力に比べてとても大きいため, 発電機構を変えても駆動するのは難しいと考えられる. そのため発電機に組み込めなかったモータ 3 に期待し, 低圧下で発電できるのか次のような実験を行った.

【実験方法】

前章と同様に窒素ガスを用いる. 水力発電機を LHP に組み込むことが出来ないため, モータ 3 に直接プロペラを取り付け, 配管を用いて直接窒素を当て, 回りはじめの圧力および最低駆動圧力を出力電力とともに記録した.

【結果・考察】

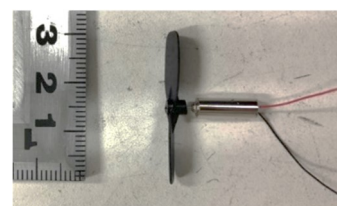


Fig.13 実験に用いたプロペラ

結果を Table.7 に示す.

Table.7 モータ 3 での発電実験

	圧力 [MPa]	出力電圧 [V]
1	0.16	0.02
2	0.14	0.016
3	0.12	0.012
4	0.1	0.008
5	0.075	0.004

このように、毛細管力ほどの低圧力でもモータ 3 は発電できることが分かった.
よってモータ 3 を使用して発電機構を設計していくこととする.

(2). 発電機の設計実験

[目的]

発電機構を LHP の内部にプロペラを設置するものと仮定し、プロペラをより効率よく回し発電するための作動流体、管径、負荷熱量を検証する.

[実験方法]

研究室で過去に製作した LHP の蒸発器部分を使用し、蒸発器にヒートブロックを取り付け Fig.12 のような開放系で発電する実験装置を製作し、電圧計でモータの発電電圧を、温度計によりヒートブロックの温度を確認しながら以下のような手順で実験を行った.

- 1, 作動流体を液体注入口より注入する
- 2, ヒートブロックに電力をかけ蒸発器を加熱する
- 3, 温度計の温度を確認しながら蒸気口より蒸気が出てくるのを待つ
- 4, 蒸気口にプロペラを取り付けたモータを近づける
- 5, 発電電圧を確認し記録する
- 6, 実験条件を変え 1 ~ 5 の手順を繰り返す.

変える実験条件は以下のように考え設定した.

・作動流体

低沸点・低蒸発潜熱のものが良いと考え、アセトン(沸点 56.2 °C, 蒸発潜熱 500 KJ/kg)と R123(沸点 27.6 °C, 蒸発潜熱 171.4 KJ/kg)の 2 種類を用いて実験した.

- ・配管の管径

管径の小さい方が流速が上がり、プロペラを強く回すことが出来ると考え、管径を 1/16~1 インチの間で変化させて実験を行い、最適なものを探した。

- ・負荷熱量

負荷熱量を自在に変えられる加熱方法としてヒートブロックを用い、蒸発器部分に取り付け 100~450W の間で熱量を変化させて実験を行った。

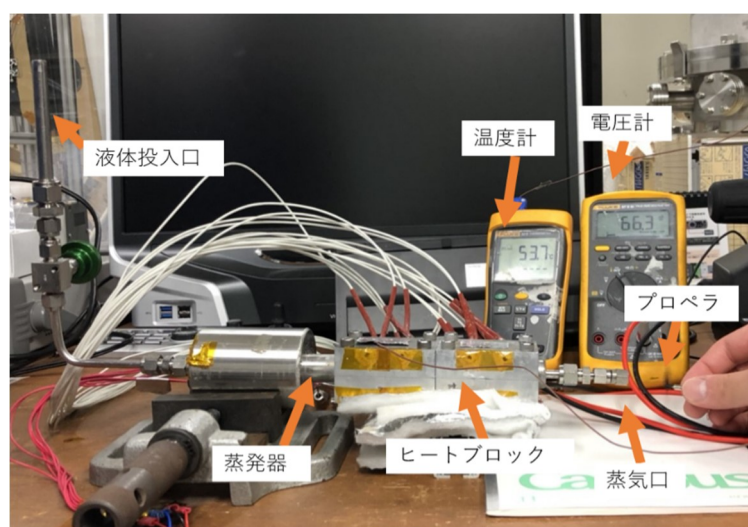


Fig.14 実験装置

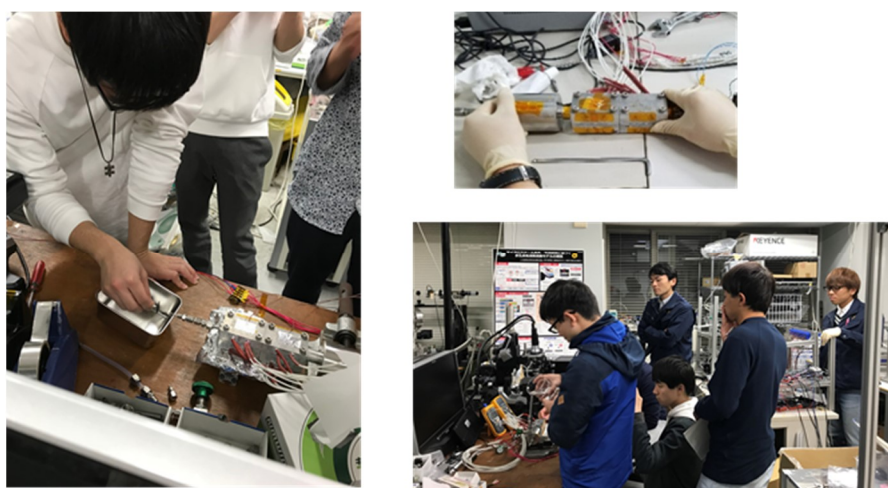


Fig.15 実験の様子

[結果・考察]

作動流体としてアセトンを用いた場合の結果を **Table.8** に示す。

Table.8 アセトンでの実験結果

		供給電力[W]			
		120	200	300	450
管径[in.]	1	×	×	×	
	1/4			○	○
	1/8				○
	1/16				○

450 W の負荷熱量をかけることでプロペラを動かすことに成功した。しかし、蒸気の力が弱くプロペラを連続的に動かすことはできず、発電には至らなかった。管径は 1/8 インチの場合最もプロペラを動かすことが出来た。そのため管径を 1/8 インチが最適であると考えられる。

次に作動流体を R123 に変えて実験した。結果は Table. 9 に示す。

Table.9 R123 での実験結果

		供給電力[W]	
		144	169
管径[in.]	1/8	○	○
出力電圧[mV]		40~120	100

作動流体を R123 とすることでプロペラを連続的に回し、発電することに成功し、出力電圧は 100 mV 程度であった。つまり、LHP 機構の一部を用いて電力を取り出すことが可能だということが証明できた。この時の実験動画を添付する。これらの結果より管径は 1/8 インチ、作動流体は R123 が適していることが分かった。また、実験時、プロペラの形状や直径がこの発電機構に合っていないように感じた。そのためプロペラを 3 枚羽にする、プロペラの直径を小さいものに変えるなどして工夫すれば、より効率よく発電できると考えられる。

今回、LHP の 1 部を用いた発電機構で発電することに成功した。しかし、得られた電圧は 100 mV 程度であり、ホバーカーを浮遊させるのに十分な電力を CPG で得られないことが明らかとなった。そのため CPG を直接組み込むのではなく、充電として用いるなど、ホバーカーの機構そのものの変える必要があると考えられる。

7. 結言および今後の展望

本実験では、LHP 内に発電機を取り付け、LHP 内の毛細管力を用いてプロペラを回す

ことで発電，電力を取り出し，それを用いて物を動かす実験を行った．その過程で得られた知見，結果を以下に記す．

1. LHP の駆動原理を理解し、作動流体をアセトンとした場合の最大毛細管力を理論式より算出した。これらを元に発電機に求められる必要条件を明らかにした。
2. LHP に小型水力発電機を組み込むこととし、発電機の比較実験、モータの選定を行い、より効率のよい発電システムの検討を行った。
3. LHP の蒸発器のみを取り出し、直接プロペラを回転させる装置を新たに構築した。この装置において、作動流体をアセトン、R123 を用いて発電実験を行い、R123 を用いることでプロペラを回すことに成功し、約 100 mV の電圧を得ることができた。これにより、毛細管力を用いた発電に世界で初めて成功した。

次に今後の課題，展望について述べる．

1. 毛細管力を用いた発電には成功したが、目標であった LHP に発電機を取込み、毛細管力を使って発電し電力を得るところまでにはいかなかった．実際に実験を行ってみて、熱や毛細管力を用いて発電することは難しいことであると分かった．しかし、実験終盤で用いた超小型モータに適した発電機の機構の開発、発電機内のプロペラのより回りやすい形への改良、また LHP の媒体をより優れた媒体にすることで CPG の実現は可能であると考えている．
2. CPG が実現できた時には、LHP の加熱部に温泉などの地熱、太陽光、エンジンなどの廃熱を当てることによって CPG を駆動させ、それにより得られた電力を用いてバッテリーの充電ができると思われる．また、LHP は宇宙空間で用いられている電力不要の熱エネルギー輸送デバイスであるため、宇宙空間で化学燃料などを用いることなく電力を得られる優れた発電機となると考えている．

8. 謝辞

本実験は株式会社八光電機様より頂いた実験費の助成により行うことができました．また、熱の実験コンテストという貴重な場を設けて頂き深く感謝の意を表します．

また、本実験を行うにあたり丁寧かつ熱心なご指導をして頂いた長野方星教授，上野藍助教，本実験に協力してくださった長野研究室の皆様に深く感謝致します．