

蒸発を利用した太陽光パネルの 冷却とその実用

所属 山梨大学大学院医工農学総合教育部
工学専攻機械工学コース 武田研究室
代表者氏名 石川公章 座安祐一郎 三瓶大地 須賀豪太

1. 緒言

近年地球温暖化が問題視され、世界的に脱炭素が求められ様々な対策が行われている。しかしながら、我が国の発受電力量は2011年の東日本大震災以降、原子力発電を停止した影響によって火力発電の割合が増加している。Fig. 1に我が国の発受電力量の推移を示す。図からわかるように、震災以降は新エネルギーの開発、普及が広がったこともあり、新エネルギーの割合が徐々に上昇している。

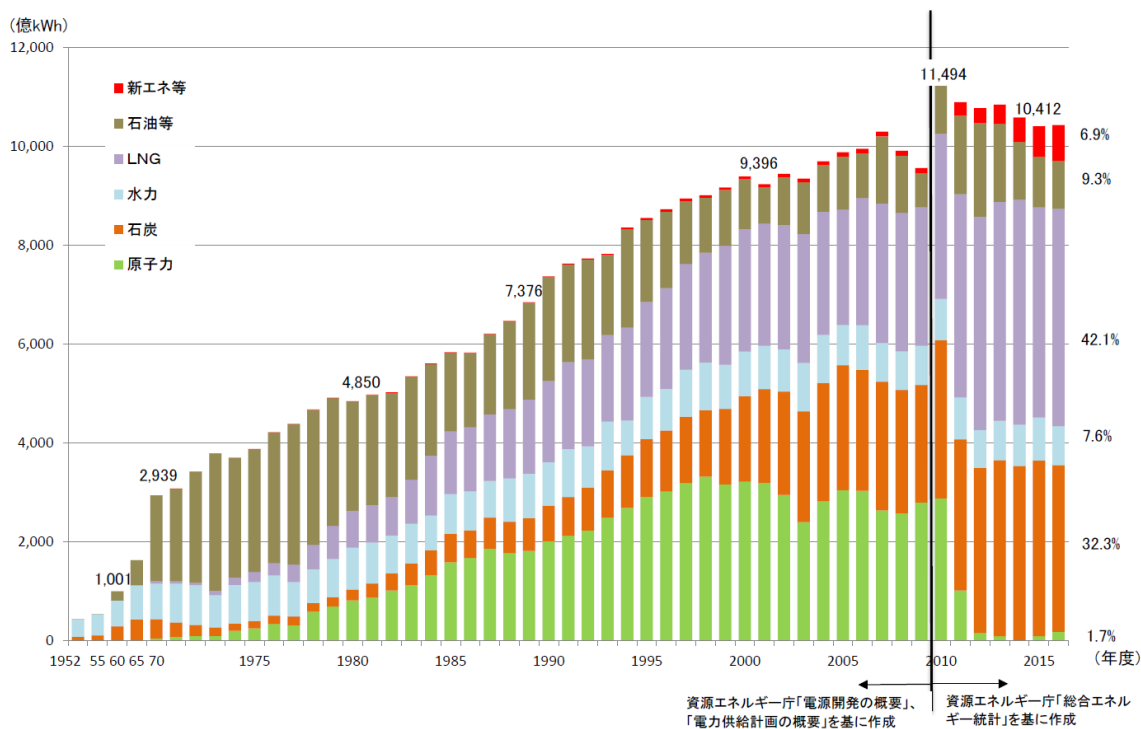


Fig. 1 発受電力量の推移

(出典：経済産業省 資源エネルギー庁 エネルギー白書)

特に近年増えた新エネルギーの中では太陽光発電による割合が高く、2012年7月の固定価格買取制度開始後では、再生可能エネルギーの導入量の約95%が太陽光発電である¹⁾。増加した太陽光エネルギーによる発電ではあるが、太陽光発電が抱えるシステムとしての問題は残されており、瞬間的に変化する陰りの問題やパネル表面の汚染度、温度上昇に伴う発電量の低下などがある。

太陽光パネルは日射量に応じて発電出力が増加する一方で、表面温度が上昇することで発電出力が低下する熱特性を持つ。一般的に使用されているシリコン結晶型ソーラーパネルの出力温度係数は $-0.5\sim-0.4[\%/^{\circ}\text{C}]$ とされ、パネル表面温度 25°C を基準温度として、そこから 1°C 上昇すると $0.4\sim0.5\%$ の出力低下が起きる。日照量の多くなる夏季、特に気温 35°C 以上となる猛暑日にはパネル表面温度は $60\sim80^{\circ}\text{C}$ に達し、熱による影響だけで約30%の出力低下となる。その結果、夏季では月別の発電量では低い傾向にある。

パネルの冷却にはパネル表面に散水することで気化熱による冷却を狙ったシステムなどもある。しかしながら、これは表面に散水するため光が拡散し発電効率が下がり、また水道水では利用できないので、導入のコストやメンテナンスも相まって広く普及していない。

そこで、本課題ではパネル裏面に水分を含んだ繊維を張り付けることで冷却を促すシステムを提案する。水分の供給を毛細管現象に任せ、さらにパネル表面に影響を与えずに温度を下げ、発電量を上昇させることを目的とした。ここでは、実験結果を報告する。

2. 実験の目的

太陽光パネル裏面に繊維を張り付けることによって気化熱を使って裏面から太陽光パネル全体の温度を下げるシステムを製作し、温度低下量、発電量を求め、繊維を取り付けていないパネルとの比較を行う。また、本システムにより発電した電力で小型のワンセグテレビを映し、使用時間を比較することで発電量の比較を行い、本システムの有用性を示す。

3. 実験装置概要

Fig. 2 のようにパネル裏面に繊維を張り付けて測ることを想定する。パイプに水を通し、水を吸わせた繊維を垂らすことにより裏面から熱を奪う。

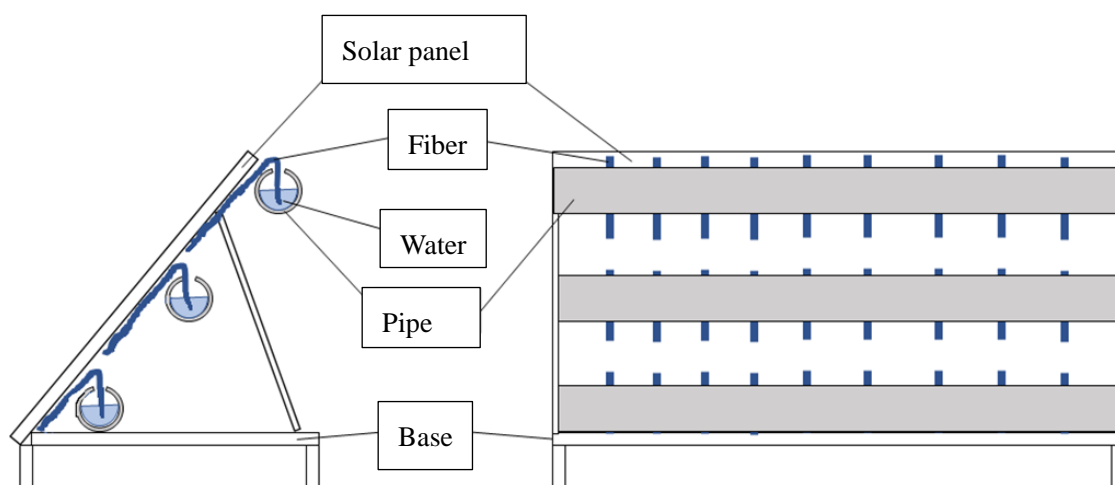


Fig. 2 実験装置構想

4.1 繊維の選定

気化によって大気中に奪われる熱量は、周囲や液体の条件が同じであれば蒸発した水分の量によって決まる。そこで、より多くの熱を取るには、より多くの水を吸い、気化させる素材の選定が必要になる。吸汗速乾の肌着では表面と裏面の編み方を変えることによって、肌にあたる側では多くの水を吸い、外気に触れる側では表面積を増やして多くの水分を蒸発させている²⁾。

北海道立消費生活センターの研究では綿などの素材に対して吸汗速乾素材は蒸発量において優れていることが示されている³⁾。そこで、手軽に手に入る吸汗速乾性の肌着を5着と綿の肌着を1着用意した。製品名が同じであっても繊維の素材比率が異なるものがあったため、異なるものでは2種用意し、UNIQLO、GU、IGNIOの5着用意した。Table 1に用意した肌着の詳細を示す。

Table 1 実験で用いる肌着

Fiber type	Manufacturer	Product name	Composition	Name in experiments
Quick dry	UNIQLO	AIRism	Polyester 88% Polyurethane 12%	UQ A
Quick dry	UNIQLO	AIRism	Polyester 89% Polyurethane 11%	UQ B
Quick dry	GU	GU DRY	Polyester 90% Polyurethane 10%	GU A
Quick dry	GU	GU DRY	Polyester 92% Polyurethane 8%	GU B
Quick dry	IGNIO	STRECH DRY	Polyester 88% Polyurethane 12%	IGNIO
Cotton	Cecile	男の綿 100%消臭・抗菌	cotton100%	cotton

4.2 吸い上げ高さ、速度

十分な高さまで水分を吸い上げない場合や水分を吸い上げる速度が遅い場合では裏面に張り付けた繊維への水分の供給が十分に行われず、水彩絵の具を溶かした水に用意した肌着を浸すことにより、毛細管現象でどの程度重力に逆らい水分を吸い上げることが出来るかを30分おきに計測した。肌着の裾が浸る程度に水槽を設置した。繊維への水分の吸い上げは毛細管現象によって起きる現象であり、繊維の目の細かさに依存するため、温度や湿度の条件は設定していない。本実験は問題なく水分を吸い上げることを確認するための予備実験であるため実験回数は1回とした。実験の様子をFig. 3、結果をFig. 4に示す。

90分経過時の水分の吸い上げ高さの約80%は実験開始からの30分間に水分が吸い上げられていることがFig. 4からわかる。実験開始30分までの1分当たりの水分の吸い上げ高さを実験終了時点での水分の吸い上げ高さをTable 2に示す。

UNIQLOの肌着とGU製Bと綿の肌着では30分までの水分の吸い上げ速度は0.6(%/min)程度である。本研究において用意した肌着では、水分の吸い上げ速度においてUNIQLOの肌着とGU製のBと綿の肌着が優れた傾向にあると思われる。



Fig. 3 吸い上げ実験の様子

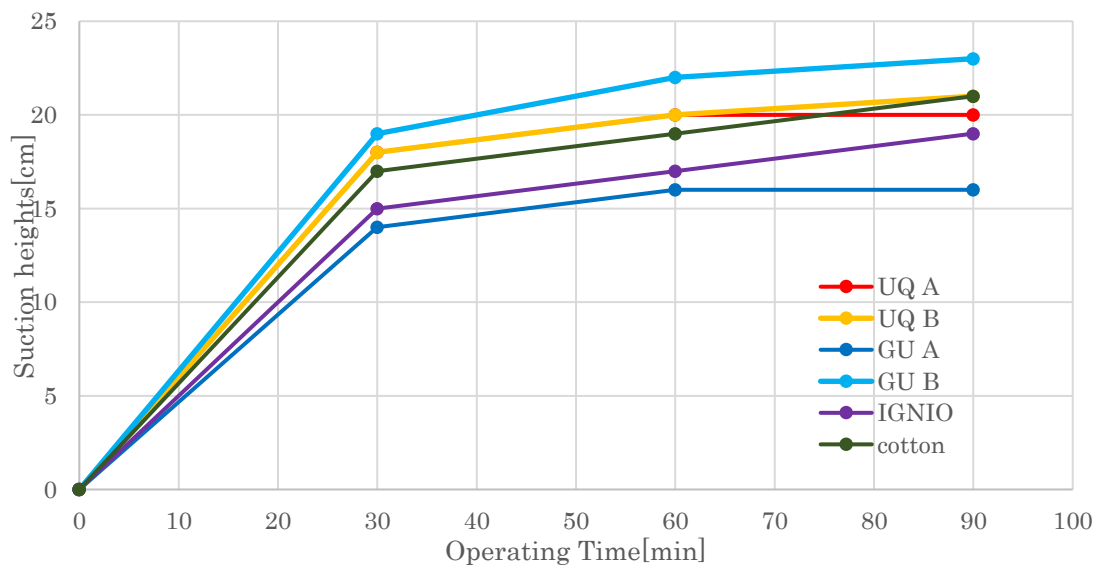


Fig. 4 吸い上げ実験結果

Table 2 実験結果

	UQ A	UQ B	GU A	GU B	IGNIO	cotton
Suction speed for 30minutes (cm/min)	0.6	0.6	0.47	0.63	0.5	0.57
Suction heights In experiments end (cm)	20	21	16	23	19	21

4. 3 蒸発量

繊維の選定において、蒸発量を測定した。用意した肌着から同じサイズで布辺を切り抜き、一定量の水を滴下し、経過時間ごとの水分量を計測することで、繊維に吸われた水分の蒸発量を計測する。肌着では着心地や機能性の面から、表裏で繊維の編み方を変えており、一般的に速乾性の為には表面の繊維の編み方を変えるため、表面からの蒸発量を比較する。

切り抜いた肌着の大きさは用意した肌着の都合上 13.5×8.5cm とし、滴下水分量は同型の布を水に浸した後に絞った物の質量差から 2.4cc が適当と判断し 2.4cc 滴下した。実験時間は 30 分ごとに質量を測定し、合計 90 分行った。本予備実験は蒸発速度を測るものだが、蒸発には環境の温度、湿度、風速等の要素が影響するため、再現性の為 3 回実験をした。

実験は室内で行い、温度は 7~8°C、風速は 0m/s、湿度は 99~100%程度であったが制御したものではない。再現性のために行った 3 回の実験結果を Fig. 5 に示す。実験結果のバラつきは、実験室内の空気の状態が 3 回の実験において同条件でないことが影響している。

実験時はすべての布を並べて実験していたので、実験時ごとの周囲の環境は全ての布において同じと考えられる。したがって、開始 30 分までの各実験条件の蒸発量を、同時に実験をしていた布の蒸発量の平均値で割ることで無次元化した値を 3 回の実験でそれぞれ求め、3 回の平均値を取ったものを蒸発量の評価とする式 (1) を用いて評価した。評価の結果を Table 3 に示す。

評価値より UQ A と UQ B, GU B では再現性を確かめた 3 回の実験において、30 分の蒸発量が本実験で用意した繊維の平均値を上回る傾向にあることがわかる。

$$\left(\sum_{n=1}^3 \frac{\text{開始 30 分までの蒸発量}}{\text{同時に行った実験の蒸発量平均}} \right) \div 3 = \text{評価値} \quad \cdot \cdot \cdot (1)$$

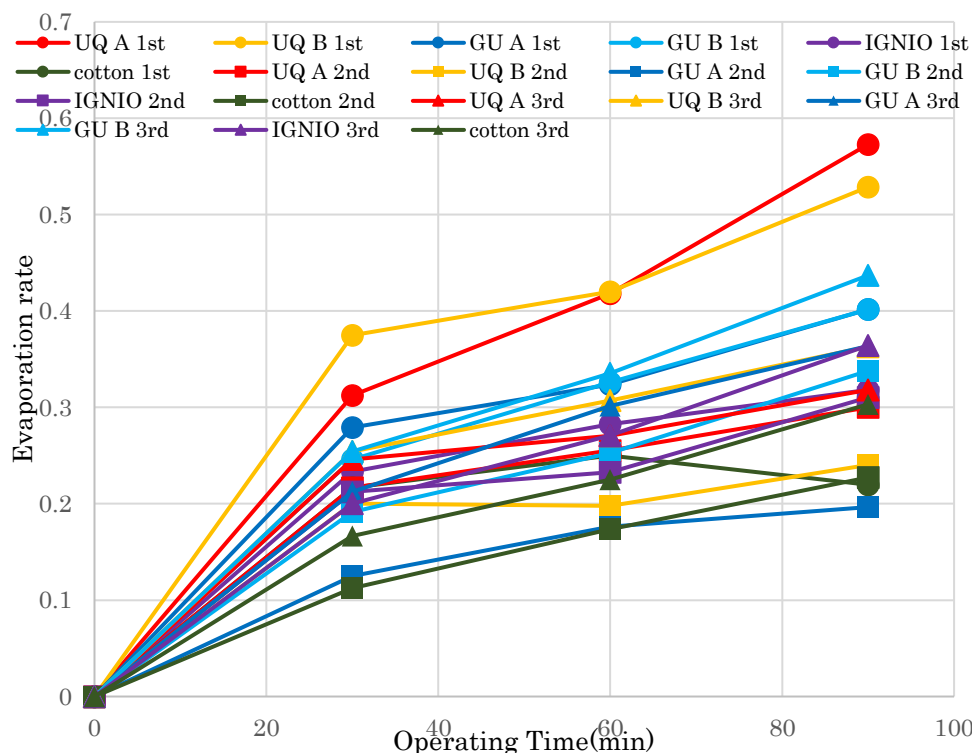


Fig. 5 経過時間ごとの蒸発割合

Table 3 蒸発量評価値

	UQ A	UQ B	GU A	GU B	IGNIO	cotton
Evaluation point (dimensionless)	1.15	1.21	0.89	1.04	0.98	0.72

5.1 照射条件

本実験では3条件行うが、屋外実験では外乱が予想されるため、屋内にて暖房を設定温度30度で設定して行い、人工光によって夏の屋外環境を再現する。本予備実験では、太陽光パネルの発電量に悪影響を与える日射条件を再現することを目的とする。

太陽光パネルは熱影響の観察を行うため、温度上昇による発電量低下の大きい単結晶シリコンの物を用いた。パネル温度を確かめるための熱電対は太陽光パネルのセルの隙間に3点設置し、その裏に3点設置した。

照射する人工光は、光量確保のためのLED投光器、熱量確保のための白熱電球を用意した。白熱電球は200Wの白熱電球を2機、100Wの白熱電球を1機設置し、8時間放置した。本予備実験における実験装置と熱電対設置位置をFig. 6, 7, 8に示す。使用したLED投光器、白熱電球、太陽光パネル、測定機器の詳細をTable 4に示す。

Table 4 照射実験使用機器

Device name		Manufacturer	Model number	Number
Single crystal solar cell module		(株)ケー・アイ・エス	GT434S	1
100W LED Floodlight		(株)グッド・グッズ	LD302 100W	1
100W Filament Lamp		ELPA	L100V95W-C	1
200W Filament Lamp		ELPA	EVP110200WPS75C	2
Thermocouple		八光電機	HTJ3303	6
Data logger (Panel)	Main unit	江藤電気	9350A	1
	Scan unit	江藤電気	9365A	1
	Software(windows)	江藤電気	5215A	1
Data logger (Surroundings)	Main unit	Allied Electronics	Raspberry Pi 3Model B	1
	Voltage measurement	Strawberry Linux	INA226PRC	1
	Humidity measurement	BOSCH	BME280	1

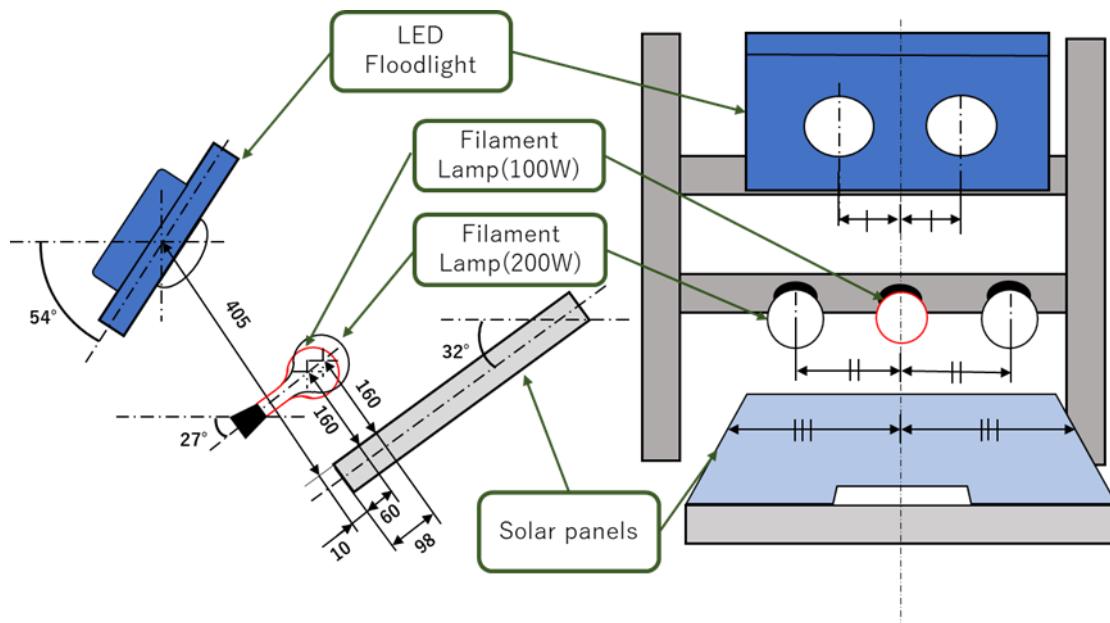


Fig. 6 照射実験装置位置関係

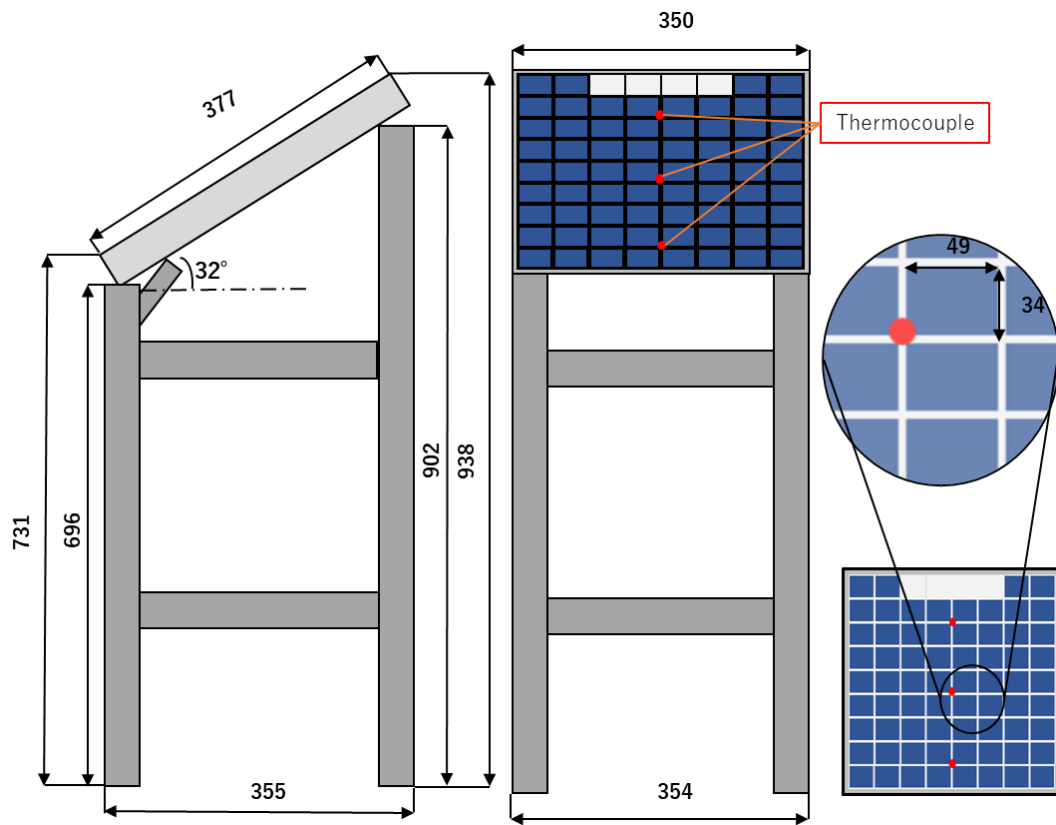


Fig. 7 使用太陽光パネル，熱電対取り付け位置

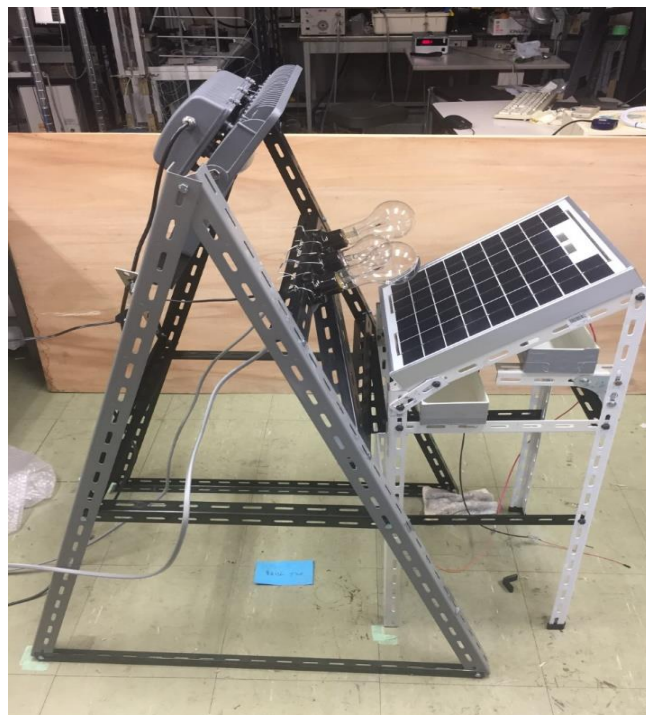


Fig. 8 照射実験装置写真

5.2 照射実験結果

照射実験の結果を Fig. 9 に示す. 室温が 25°C 程度の実験室内でパネル表面温度が 45~60°C 程度まで上昇し定常状態となったため, 太陽光パネルに悪影響を与える日射条件を十分に再現できたと考える.

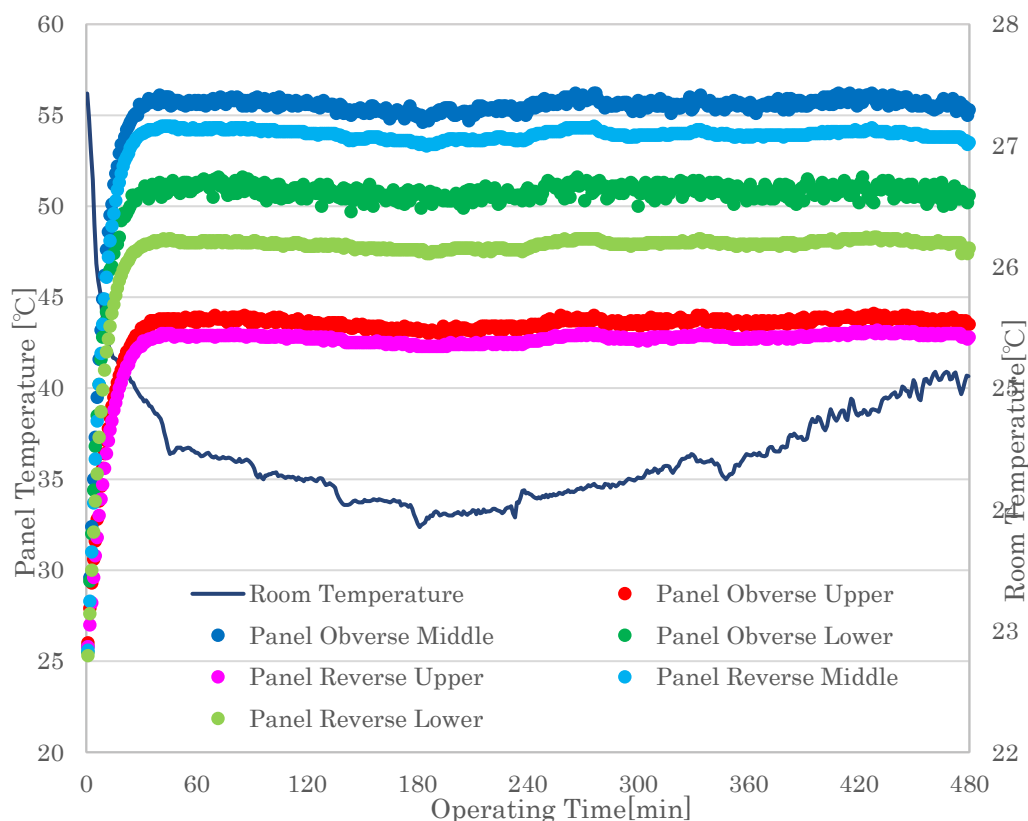


Fig. 9 照射実験結果

6. 1 発電量測定実験

水分の吸い上げ高さや照射実験を考慮し, 実験条件を見直した. パイプから繊維を垂らす形では, 過剰に水分が供給されて滴ってしまい, システムとして余剰な水分が必要になってしまうこと, また吸い上げ実験では使用予定の繊維では重力に抗して 17cm 程度を短時間で吸い上げることが可能であることがわかっていること, 風通しが良い方が気化した蒸気が逃げやすいことを考慮し, 実験装置給水部を製作した. 繊維の取り付けは繊維による水分の吸い上げ高さとパネルの大きさの都合から 2 段に分け, セルの境界を境界位置として取り付けた.

Fig. 10 に実験装置の全体図を示す. 計測機器は照射実験と同様である. また, Fig. 10 中の赤枠の位置は繊維を取り付けた部位である. Fig. 11 には裏面の繊維張り付けの様子を示す. 端点をダクトテープで張り付け, 全面を針金で簡易的に支え, 湿らせることで裏面に張り付いた状態を作っている.

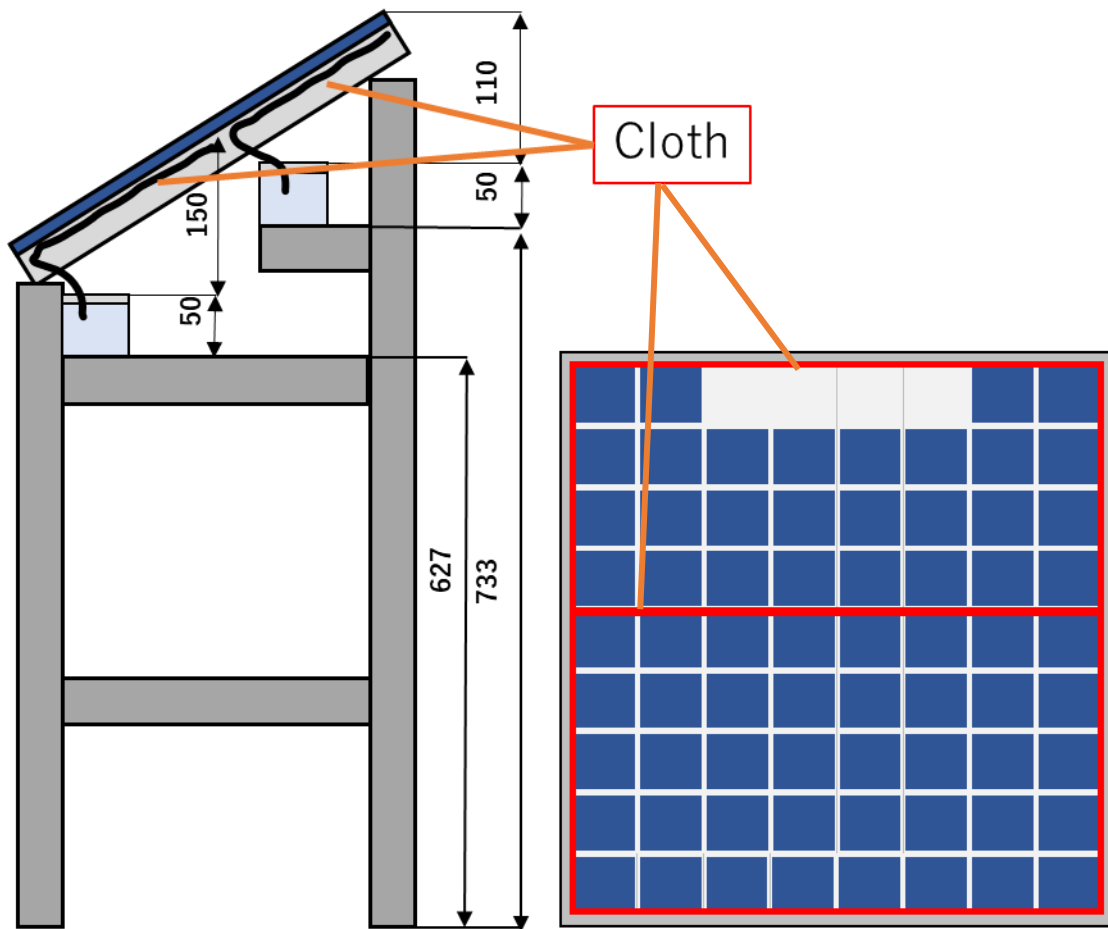


Fig. 10 発電量測定実験装置概略



Fig. 11 繊維張り付けの様子

6.2 実験条件

夏の日中温度が高い時間を想定し、実験時間は 8 時間、実験回数は再現性の為 3 回行った。繊維の毛細管現象による吸水を滞りなく行うため、給水の水槽は実験開始時に縁まで水を満たした。室内実験であり外乱が強く働くことは考えられないため、計測間隔は 1 分とした。起電力の測定のために取りつけた抵抗は $10\text{k}\Omega$ の物を用いた。

6.3 実験結果

実験条件ごとの発電量を Fig. 12, 13, 14 に示す

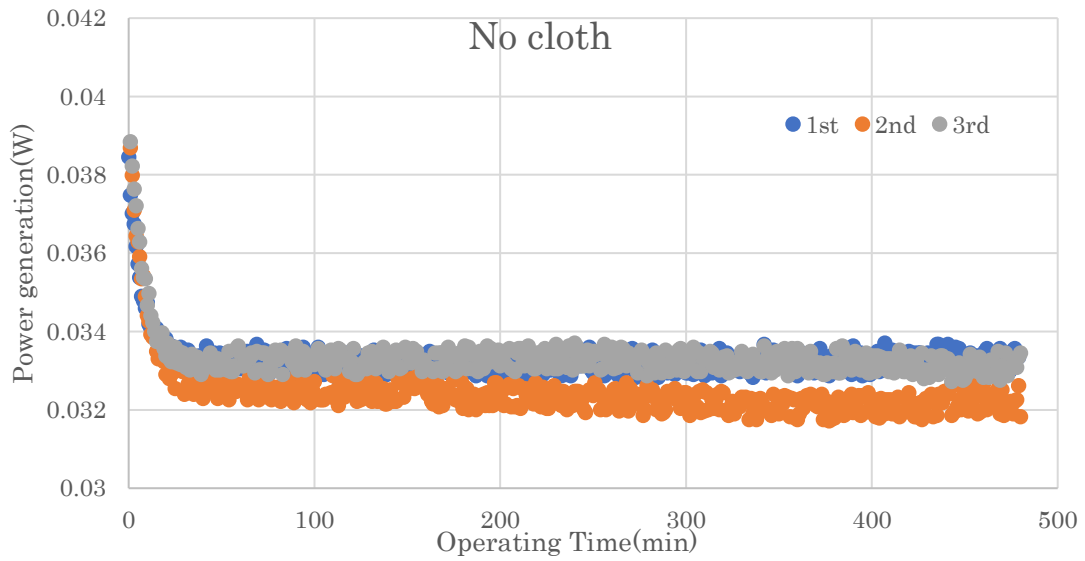


Fig. 12 繊維取り付け無しのパネルの発電量

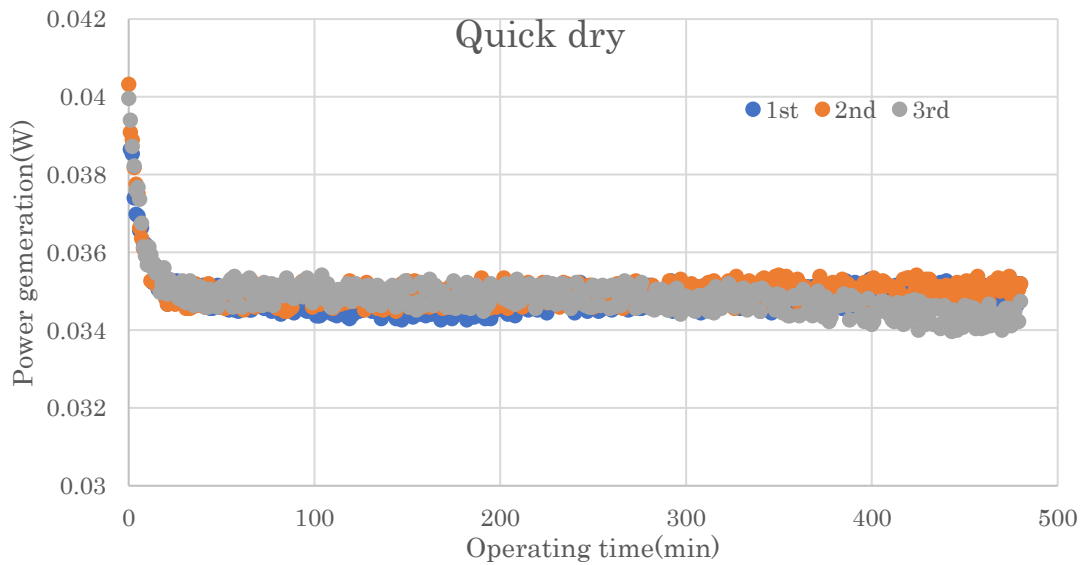


Fig. 13 吸汗速乾布取り付けパネルの発電量

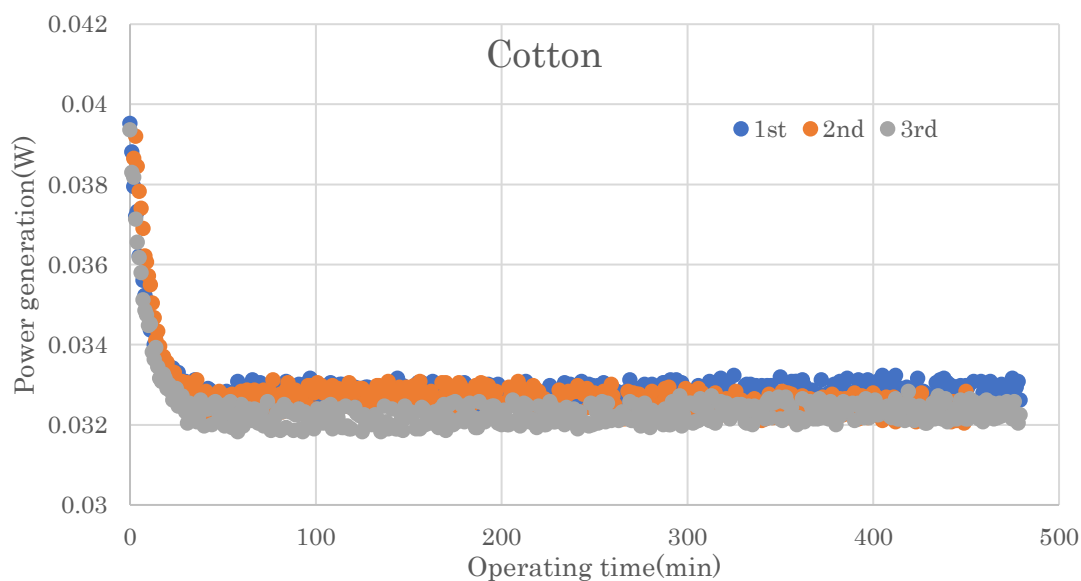


Fig. 14 綿取り付けパネルの発電量

6.4 考察

各条件において、照明の点灯後に定常状態になるまで時間差のあることがわかる。発電した電力量においてデータの信頼性を検証した。計測時間を10分で区切り、10分の範囲内での変動係数を経過時間ごとにまとめた図を Fig. 15 に示す。Fig. 15 より照射開始30分以内に変動係数が0.01以下になっているので、本研究では定常状態を照射開始より30分とした。以後の考察は全て定常状態の下で行う。

再現性の確認のために行った実験ではあるが室内条件は厳密に制御していないので、再現性として有用な実験であるかの検討を行うため、3回の実験において経過時間ごとの変動係数をまとめた。

結果を Fig. 16 に示す。実験を行った3条件共に変動係数が0.01程度であることがわかるので、本実験では再現性は十分に保証されるものと考えられる。また、定常状態になった後の実験終了時までの発電した電力量を実験条件ごとにまとめた表を Table 6 に示す。

発電量の比較において吸汗速乾の布を張り付けた場合では、貼り付けない場合に比べて5.9%の発電量の増加がみられ、綿をつけた場合では3.3%の発電量低下がみられた。本実験は外乱の無い室内実験であるため、発電量は太陽光パネルの発電素子温度のみに影響されると考えられる。

Table 6 実験条件ごとの発電量

	No cloth	Quick dry	Cotton
Generated energy (Wh)	118.7	125.7	114.8
Coefficient of Variation	0.013	0.002	0.030

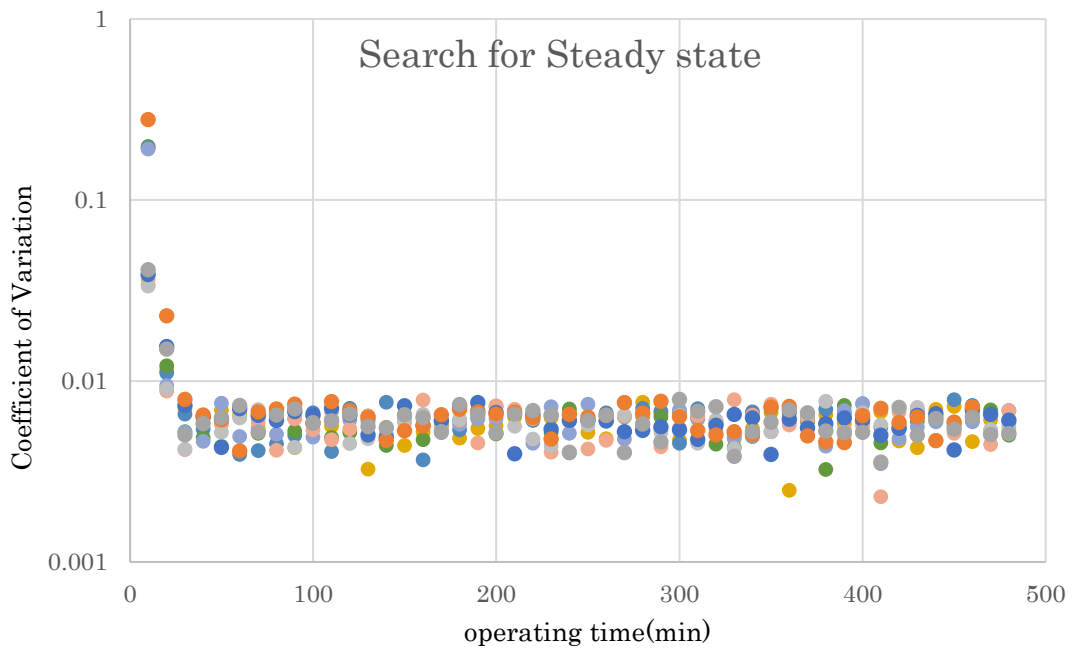


Fig. 15 定常状態の確認

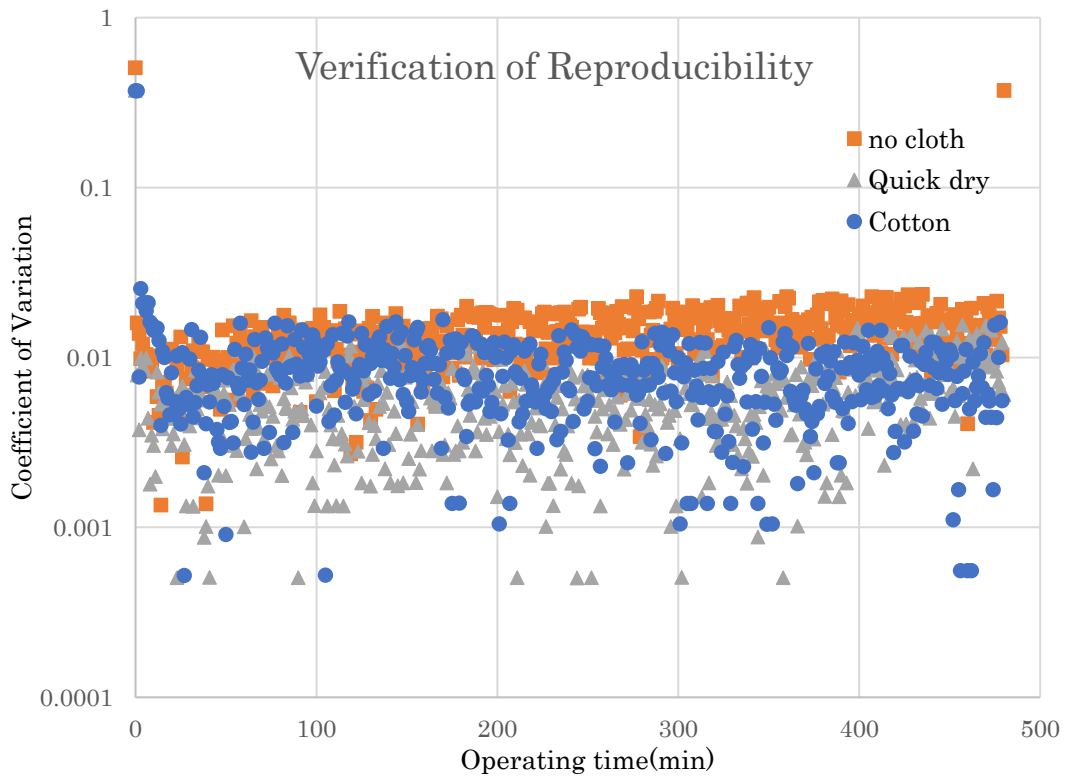


Fig. 16 実験の再現性の確認

Fig. 19 に各実験条件において計測したパネルの温度を示す。また、Table 7 に計測地点ごとのパネル表裏の平均温度差を示し、本実験において想定されるパネル周りの熱の流れを Fig. 17 に示す。Fig. 17 において黄色い矢印は熱源からの熱、青い矢印はパネル冷却のために流れ込む冷えた空気、紫の矢印はパネル裏面の自然対流、橙色の矢印はパネル裏面から流れ出す温められた空気、パネル内の赤色グラデーションの矢印はパネルの熱伝導によるものである。また、パネルの加熱は光源位置の偏りから下部、中部、上部の順で加熱される。繊維無しでのパネルでは、温度差が下部、中部、上部の順で大きいことから、除熱は裏面での空気の自然対流によるものだと考えられる。

Fig. 18 に太陽光パネルの下半分へ取り付けを行った繊維の上部の様子を示す。本実験機では、繊維の取り付けによってパネル裏面の空気の循環が阻害される。綿の取り付けにおいては、裏面の空気の循環の悪化の結果、繊維に吸い上げられた水分の温度が上昇し、パネルの冷却が阻害されたと考えられる。パネル上部裏面では加熱された空気が上部から流れ出ることが出来る。下部、中部で十分に空気中へ放熱されなかった熱がパネル内を熱伝導で伝わり、上部で放熱されることでパネル上部に温度差が出来ていると考えられる。

吸汗速乾の布を張り付けた場合においても空気の循環の阻害は同様に存在する。しかしながら、気化量が多いため、奪う熱量が多くなり、加熱の大きいパネル下部、中部で十分に冷却が可能になる。その結果パネル上部へ伝導する熱量が少なくなり上部での温度差が大きく生まれなかったと考えられる。

大型の太陽光パネルでは、温度境界層の発達によって自然対流では十分に除熱出来ないため、吸汗速乾性の繊維の貼り付けによる冷却効果は本実験の成果以上に期待出来る。ただし、本システムを数段にわたって取り付けることは、空気の対流を阻害するため、優れた吸水速乾性の繊維が必要となる。

Table 7 各部温度差

	Upper	Middle	Lower
No cloth	0.9	1.9	3.4
Quick dry	1.3	3.6	7.8
Cotton	4.1	2.7	4.5

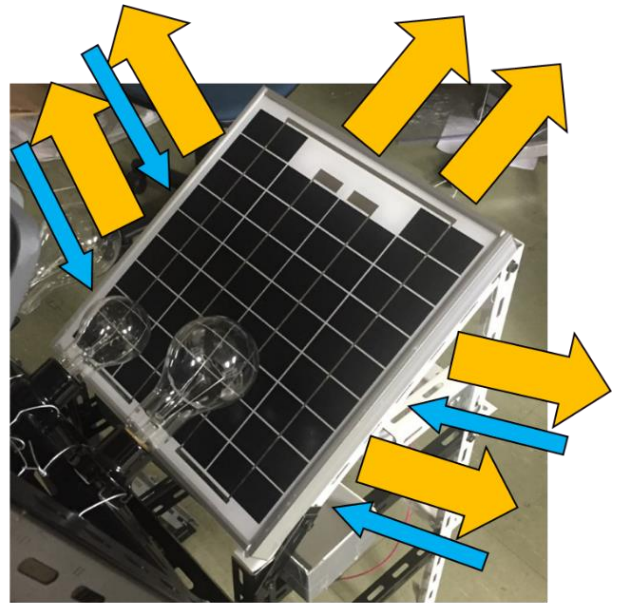
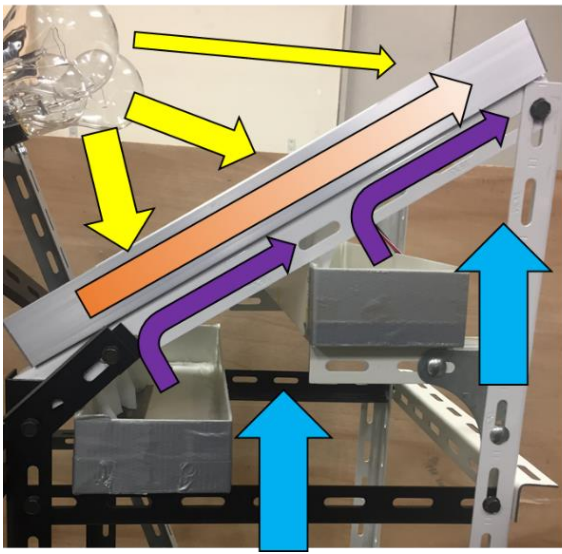


Fig. 17 パネル周囲の熱移動



Fig. 18 パネル裏面の様子

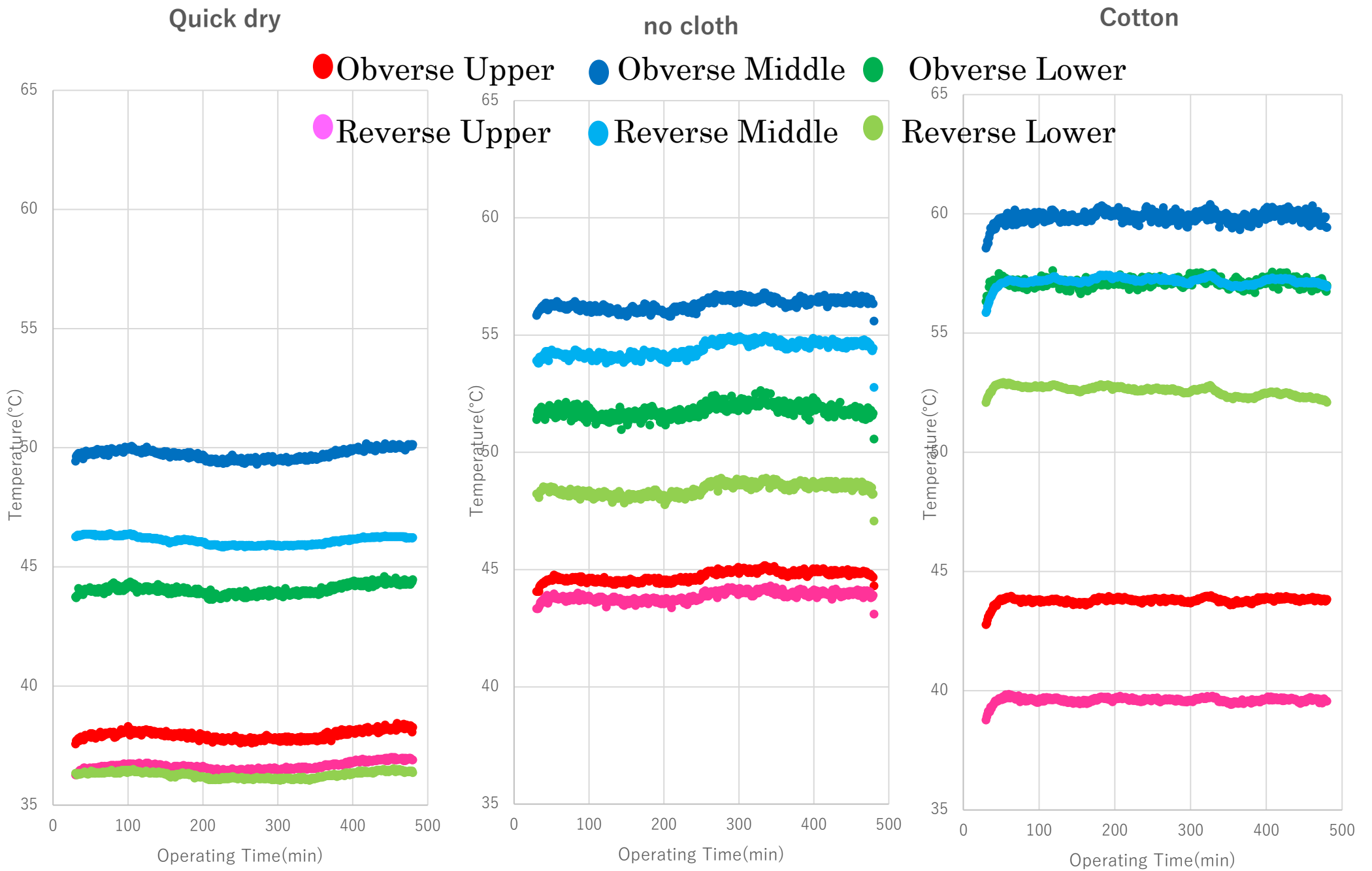


Fig. 19 パネル温度変化

7.1 発電の利用, 実感実験

ここまでの実験により得られた知見から実際に太陽光パネルによって発電した電気を用いて製品を動かし, 起動時間として発電量の差を求めた. 何もつけていない状態の太陽光パネルと湿らせた吸汗速乾の布を張り付けた物を比較した. 実験から, パネル表面の温度が定常状態になるまで 30 分程度放置し, 定常状態になったパネルからバッテリーに充電し, ポータブルワンセグテレビを起動し, 民放テレビの視聴可能時間を計測した.

時間の計測は手作業で行うため, 充電時間が長いほど作業時間によって発生する誤差は小さくなるのが考えられるが, 用意したバッテリーの都合上, 充電時間は 30 分とした. また, 再現性の為の実験は 3 回とし, 本実験では熱電対による温度計測は行わない. 実験の概要図を Fig. 20 に示す.

実験に用いた充電用のバッテリーとワンセグテレビの詳細を Table 8 に示す. 実験器具用意の都合上, ワンセグテレビはカーナビの物を用いた.

Table 8 発電利用実験使用機器

Device name	Manufacturer	Model number	Number
Lead-acid battery	LONG	WP5-12	1
Car navigation system	NPLACE	DIANAVI DNK-7636J	1

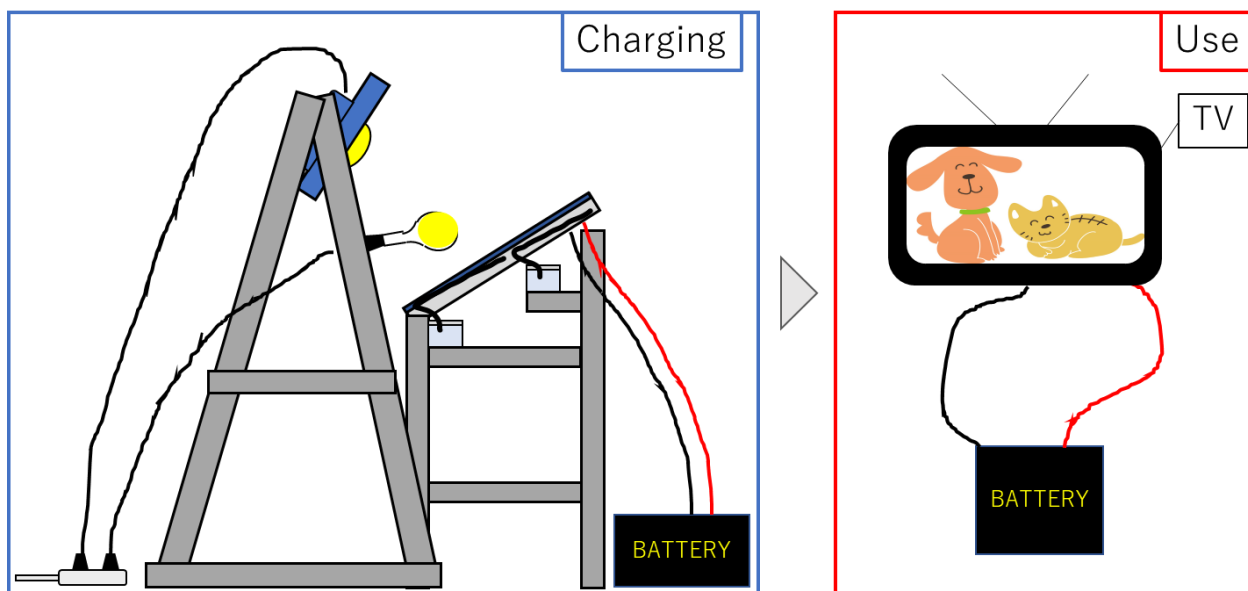


Fig. 20 発電利用実験概略図

7.2 実験結果

実験により得られた結果とその平均と標準偏差，変動係数を Table 9 に示す

Table 9 発電利用実験結果

	No cloth	Quick dry
1st(sec)	245.5	269.2
2nd(sec)	268	277.9
3rd(sec)	247.3	280
Average(sec)	253.6	275.7
Standard deviation	12.5	5.7
Coefficient of Variation	4.9	2.1

7.3 考察

視聴可能時間は 8.7%程伸びた。繊維張り付けの無い条件での 3 回の実験による変動係数は 4.9 程度であるため，実験誤差が考えられる。2 回目の実験は視聴時間の長くなる側の誤差であり，これはバッテリーの性質上発生した誤差と考えられる。誤差として視聴可能時間が長くなる側に傾いたデータではあるが，発電量計測を行った実験よりもさらに性能向上がみられた。原因としては，発電量計測を行った実験ではパネルに熱電対がついていたことが考えられる。

パネル表面の熱電対は，太陽光パネルが単結晶シリコンであることから発電量への影響が強いことが考えられるが，これは全ての実験条件に共通した条件である。パネル裏面の熱電対では，熱電対の貼り付けによって裏面に張り付けた繊維とパネルに隙間ができることで，パネルから奪われる気化熱の量が減ったことが原因と考えられる。

この結果から裏面からの気化熱によって太陽光パネルを冷却する場合，取り付ける繊維とパネルの間は密着させることがより冷却性能を向上させることがわかった。

8. 結言

- 1) 濡らした繊維の貼り付けによって太陽光パネル裏面を冷却したシステムにおいて，十分な吸水速乾の機能を持つ繊維を利用すれば温度が低下し，5.9~8.7%の発電量向上が見込める。
- 2) システムの特性上，パネル裏面の空気の対流が阻害されるため，蒸発速度の遅い繊維ではかえって性能を低下させる。
- 3) また，パネル裏面と繊維が密着していることが冷却作用を促進し発電量を増やすことが可能であると考えられる。

9. 参考文献

- 1) 経済産業省 資源エネルギー庁 基本政策分科会 第 21 回会合 (平成 29 年 8 月 9 日)
配布資料 https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/021/pdf/021_006.pdf (最終閲覧日 2019. 12. 05)
- 2) 日本化学繊維協会 化学繊維の基礎知識 吸水速乾・調湿
https://www.jcfa.gr.jp/about_kasen/katsuyaku/08.html (最終閲覧日 2019. 12. 05)
- 3) 北海道立消費生活センター 商品テスト 2014 年 吸汗速乾肌着の性能
http://www.do-syouhi-c.jp/top_test.html (最終閲覧日 2019. 12. 05)

謝辞

本実験を行うにあたり，株式会社八光電機様より実験費用の助成を賜りました．貴重な機会を提供して頂きましたことにこの場を借りて御礼申し上げます．