

神奈川工科大学
先進太陽エネルギー利用研究所研究報告

第10号

平成28年度

神奈川工科大学
工学教育研究推進機構

はじめに

研究所所長：機械工学専攻 川島 豪

本研究所は、平成 19 年度～23 年度に文部科学省「ハイテクリサーチセンター整備事業」のもと「環境対応型太陽光・熱エネルギー利用のための革新的システムの研究」を推進した組織をもとに設立され、太陽エネルギーの利用に関わる先進的な研究を遂行している。

本研究所の使命は、エネルギー創出、蓄積・利用、マネジメントの 3 要素技術を統合し、災害時に大学が避難拠点の機能を果たすためのエネルギーシステム、すなわちエネルギー地産地消を基盤とする循環型社会を成立させる自立システムの研究推進である。

本年度は、政府が再生可能エネルギー電源の比率を 2030 年に 22～24%、すなわち 2015 年度の約 2 倍に上げることを目標としているなか、再生可能エネルギーに関して太陽光発電の普及にマイナスとなる固定価格買取制度における太陽光発電の買取り価格の低下と消費者の負担増となる発電促進賦課金の上昇による電気料金の値上げが問題となり、再生可能エネルギーに関して持続可能な発展の難しさが浮き彫りになった。この状況において本研究所では持続可能な自立システムの確立を目指しており、各所員の精力的な研究をとおして優れた要素技術の開発に取り組んでいる。本書にてその成果の一部を紹介する。

加えて、研究活動の一部を「テクノトランスファーin かわさき 2016」(板子教授)、「イノベーションジャパン 2016—大学見本市」(板子教授)、「平成 28 年度あやせ環境展」(田中教授)、川崎国際環境技術展 2017」(板子教授)等に出展したことも併せて報告させていただく。

目次

1. サーモサイホンにおける制御システムの研究 (制御モデルの構築)
機械工学科 川島豪 1
自動車システム開発工学科 藤澤徹
自動車システム開発工学科 川口隆史

2. 間歇充電式新電気バスシステムに関する基礎研究
(電気バスシミュレータを用いた路線バスの消費エネルギーに関する考察)
機械工学科 川島豪 8
機械工学科 川口隆史

3. 競技用ソーラーカーの後輪操舵システム
自動車システム開発工学科 藤澤徹, 川口隆史 12

4. IT を活用した創生電力マネジメントシステム
情報工学 田中博 15

5. Solar EV に多面体・多方位設置した太陽電池モジュールの最大出力動作点追従制御に関する研究
自動車システム開発工学科 藤澤徹 19

6. 太陽光発電システムのリアルタイムパネル診断システムの開発
電気電子情報工学科 板子一隆 23
電気電子情報工学科 工藤嗣友
ホームエレクトロニクス開発学科 黄 啓新

7. 塗料を用いた防除雪氷対策の構築と検証
工学部 機械工学科 木村茂雄 27
工学部 機械工学科 山岸陽一
創造工学部 ロボット・メカトロニクス学科 兵頭 和人
基礎・教養教育センター 栗田 泰生

サーモサイホンにおける制御システムの研究 (制御モデルの構築)

研究者名：機械工学科 川島 豪
自動車システム開発工学科 藤澤 徹
自動車システム開発工学科 川口 隆史

1. 研究の目的

2011年3月11日に起きた東北地方太平洋沖地震とそれにともなう津波による東日本大震災において福島第一原子力発電所が事故を起こし、日本における電力供給のあり方が問われ、再生可能エネルギーの一層の普及促進が求められるようになった。加えて、2012年より再生可能エネルギーの固定価格買取制度が始まり、本格的な再生可能エネルギーの時代が始まった。一方で、原子力発電所からの電力供給が滞るなか、石油や石炭による火力発電所から電力供給が増え、二酸化炭素に代表される温室効果ガスの排出が増加した。2014年には省エネルギー、再生可能エネルギーの利用、燃料転換などの努力により減少に転じた（環境省、2015年）が、二酸化炭素の削減は喫緊の課題である。その実現には、広く分布しているが低密度の再生可能エネルギーを有効活用する必要があり、太陽光発電、風力発電、地熱発電、バイオマスによる発電等が精力的に研究され、実用化されてきている。現在のエネルギーの主流は何にでも使える電力であるが、最近では再生可能エネルギーの固定価格買取制度における太陽光発電の価格は大幅に下がり、太陽光以外の再生可能エネルギーの利用が求められている。日本では、太陽光発電が普及する以前に風呂用に太陽熱温水器が流行した。しかし、木造住宅の屋根に重量のある太陽熱温水器を設置することの危うさ、メンテナンス不備などの理由により廃れてしまった。このような状況において、天候が安定しない日本では天候に左右され難い太陽熱を有効利用できるシステムの開発は重要な課題である。そこで、外部電源を使わずに熱移動できるサーモサイホン（熱サイホン）、特に屋根の上に設置した太陽熱集熱器から地上へ熱エネルギーを移動する上部加熱式（トップヒート式）サーモサイホンを対象とし、安定した熱移動を実現する制御システムの開発を目的とする。

2. 研究の必要性及び従来の研究

サーモサイホンには、毛細管方式、浸透圧方式、蒸気圧方式、蒸気浮力方式などが

ある。毛細管方式、浸透圧方式は毛細管や半透膜が必要となり、流量の増加に対応し難い。蒸気圧方式は弁などの構造が複雑となる。そこで、本研究では蒸気浮力方式を対象とする。この方式は1970年代より研究され（例えば、Morrisonによるレビュー⁽¹⁾、平嶋らの研究⁽²⁾、一法師らの研究⁽³⁾）、伊藤が凝縮器を改良し⁽⁴⁾、吉田が引き継いでプレハブのモデルハウスに設置したサーモサイホンにより高低差4 mの循環を実現するとともに小規模の発電ができることを実証した⁽⁵⁾⁽⁶⁾。しかし屋外に設置したモデルハウスによる実証実験では、朝や夕方の太陽熱が少ない条件において、熱の移動、すなわち作動流体の循環が間欠的となる問題が残されている。そこで本研究では、安定した熱移動（作動流体の流速がほぼ一定）を実現するための制御システムを開発する。本報告では、制御システム開発のために製作した蒸気浮力方式のサーモサイホン実験装置を用いて制御に必要な解析モデルと実験結果のいくつかについて考察する。

- (1) Morrison, G.L., “Solar Water Heating”, *Solar Energy edited by J. Gordon*, ISES (2001), pp. 223-289.
- (2) 平嶋雅雄, 木村憲一郎, 宇積陽一, 木村賢一, 根岸完二, “トップヒート形サーモサイフオンの実験的研究”, 日本冷凍協会論文集, Vol. 10, No. 2 (1993), pp. 247-256.
- (3) Ippohshi, S., Tabara, S., Motomatu, K., Mutoh, A. and Imura, H., “DEVELOPMENT OF A TOP-HEAT-MODEL LOOP THERMOSYPHON”, *Proceedings of The 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference (JSME)*, TED-AJ03-578 (2003), pp. 1-8.
- (4) Ito, S., Tateishi, K. and Miura, N., “STUDIES OF A THERMOSYPHON SYSTEM WITH A HEAT SOURCE NEAR THE TOP AND HEAT SINK THE BOTTOM”, *Proceedings of ISES Solar World Congress 2007 (Beijing, China)*, (2007), pp. 930-934.
- (5) Yoshida, H., Imada, H., Hagino, N. and Yada, N., “Hydropower Generation by Solar Thermosyphon”, *Proceedings of International Conference on Solar Energy and Buildings (EuroSun2014, ISES)*, (2014), doi: 10.18086/eurosun.2014.16.24.
- (6) 萩野直人, 吉田博夫, 今田晴彦, “自己循環型熱サイフォンに関する研究（基本的特性について）”, 日本機械学会論文集, Vol. 82, No. 837 (2016), DOI: 10.1299/transjsme.15-00596.

3. 期待される効果

発電量が天候・昼夜に左右される太陽光ではなく、安定している太陽熱を利用すること、加えてその制御システムを構築することで、エネルギーを効率よく安定して得られるようになる。さらに、その制御システムの電力をエネルギーハーベスティングで創り出すことで、再生可能エネルギーでの運用が可能となり、温室効果ガスの排出削減に貢献できる。

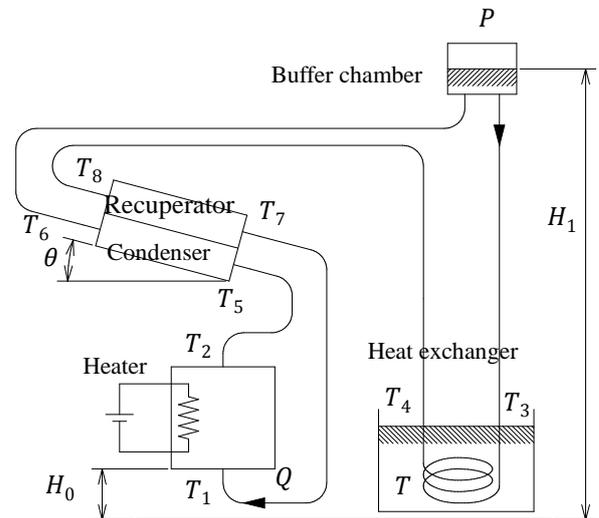
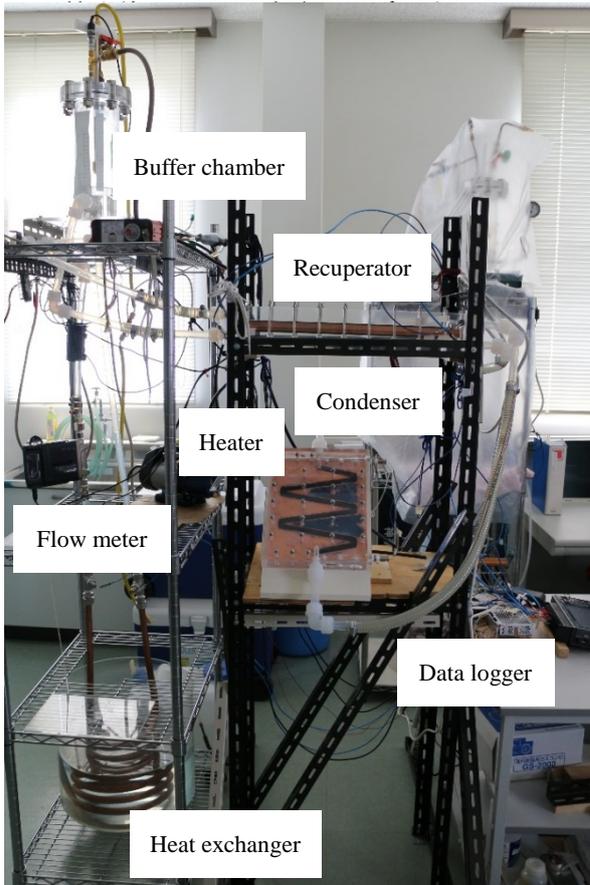
加えて、外部電源なしで駆動できることから外部電源が消失した災害時にも使用で

きる BCM (Business Continuous Management) にも有用なシステムとなりえる。

4. 研究の経過及び結果

4-1 サーモサイホン実験模型

サーモサイホン実験模型の写真と概略図を図 1 に示す。ヒータでの沸騰、ヒータから凝縮器への 2 層流の流れ、凝縮器で蒸気が冷やされて消える様子を観察できるように、ヒータおよび凝縮・復熱器における流路の 1 面は透明なアクリル板で製作されており、パイプで配管されている。



(a) Photograph

(b) Schematic illustration

Fig. 1 Experimental apparatus for thermosyphon utilizing vapor bubble pumping

本実験では、まず液溜め (Buffer chamber) を減圧して作動水の沸点を下げる。そして太陽熱集熱器を模擬したヒータで作動水を加熱して沸騰させ、2 相流 (スラグ流) の気泡の浮力で作動水を駆動する。復熱器と一体の凝縮器 (Condenser) で気泡を凝縮させて液体に戻し、少し離れたところに設置され、氷により銅管周囲の温度が一定に保たれた熱交換器 (Heat exchanger) で顕熱を放出する。冷えた作動水を凝縮器と一体

の復熱器 (Recuperator) で凝縮器から得た潜熱と顕熱により予熱し、ヒータに循環させる。これにより外部電力なしでヒータから熱交換器の冷却水に熱が移動する。

まず、ヒータで蒸発した水蒸気が凝縮器で消えることを確認した。

次に実験結果の一例として図 2 に、2 時間ほどヒータを 833 W の電力で加熱して実験装置を安定させた後、約 40 分間 533 W の小さい電力で加熱し、約 20 分間 1008 W の大きい電力で加熱、そして約 30 分間 408 W の小さい電力で加熱した場合のヒータ入口と出口、凝縮器入口と出口、熱交換器入り口と出口、復熱器入口と出口、液溜めの負圧、その値を用いて算出したヒータにおける沸点、熱交換器出口付近の流量の変化を示す。ヒータ出口温度がほぼ沸点であること、入力電力が小さい場合に作動水の流れが間欠的になることが解る。また、ヒータへの入力電流と作動水の平均流量の関係を図 3 に示す。ヒータの電気抵抗は一定と仮定できるので、入力電力と作動水の流れのパワーがほぼ比例関係にあることが解る。ただし、流れのパワーは電力に比べて非常に小さい。

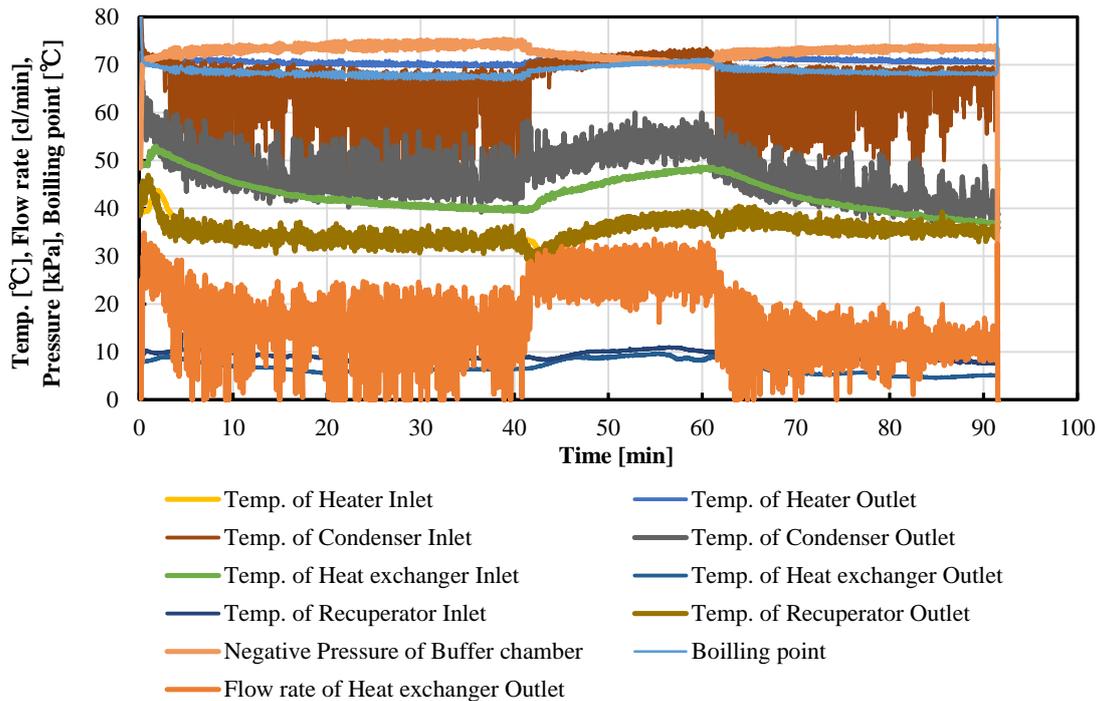


Fig. 2 Representative example of experimental results in case of changing the input power of heater

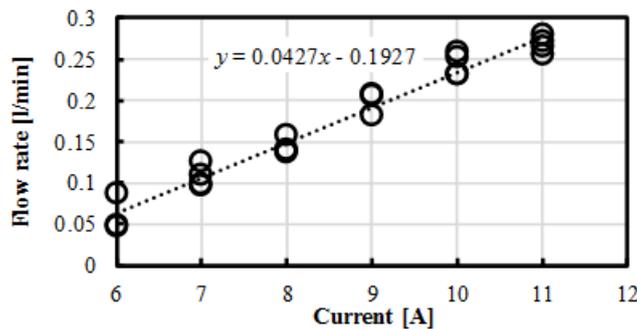


Fig. 3 Relationship between the input current of heater and the flow rate

4-2 シミュレータ

4-2-1 熱収支

流路が閉じており、蒸発した水蒸気は浮力で直ぐにヒータから移動するが、全ての作動水が蒸発するわけではないので蒸発エネルギー（潜熱）はそれほど大きくないと仮定できる。配管途中での放熱は無視できると仮定すれば、復熱器の入口と出口の温度差は凝縮器の入口と出口の温度差に潜熱を加えた値であり、ほぼ等しいと仮定できる。ヒータの入口と出口の温度差は熱交換機の入口と出口の温度差に潜熱を加えた値であり、温度差はほぼ等しいと仮定できる。したがって、ヒータの入口と出口の温度差はヒータへの入力電力より推定でき、熱交換器出口での温度、および凝縮器出口と復熱器出口の温度差は銅と水の熱伝達より推定することで、各部温度を算出できる。なお、管内圧力と沸点の関係は、Antoine の式から求めることができる。

4-2-2 作動水の流量モデル

図 2 より、ある流量以下では流れが間欠的になることから作動水が連続的に循環する最小流量が存在するものと考えられる。そこで、ヒータにおいて作動水の温度を沸点まで上昇させられる入力があれば連続的な流れが生じ、それ以下の入力では沸点に達した分の作動水のみ流れる間欠流になると仮定できる。ヒータへの入力電流を I [A]、抵抗を r [Ω]、効率を η 、水の比熱を R [J/(kg·K)]、水の密度を ρ [kg/m³]、沸点とヒータ入口温度の差を ΔT [K] とすれば、流量 Q [m³/s] は次式となり、これらをベースにシミュレータを構築した。

$$Q = \frac{r \cdot I^2}{R \cdot \Delta T \cdot \rho} \quad (1)$$

4-2-3 日照量モデル

実際に野外に設置されたサーモサイホンに到達する日射量の変化を屋内実験装置で模擬するため、春分・秋分の日には緯度の角度に設置された太陽熱集熱器に到達する日射量（直達日射量と全天日射量の合計）を導出し、DSP (mtt: iBIS) により定電圧交流電源（高砂製作所：AA2000F）を制御することで、実験装置用日射量シミュレータを構築した。

4-3 制御システム

4-3-1 液溜め圧力制御の有効性の確認

制御システムを構築するにあたり、液溜めの圧力を下げることで沸点を下げて

作動水の安定した循環が実現できるか確認した。図4はヒータへの入力電力を小さい108 Wとし、間欠的な沸騰が生じた77分に液溜めの圧力を下げた場合の結果である。まず、ヒータ上部および周囲の管内水が沸点まで温められ、沸騰し、管内水が僅かに循環する。しかし、ヒータ内に低温の水が流れ込み次の沸騰が起こるまで循環が止まる。これが繰り返されて間欠的な循環が繰り返される。そこで、77分に液溜めの圧力を下げた結果、沸点が下がり、沸騰が連続的に生じた。ヒータへの入力電力が少ないため流れは間欠的ではあるが、ほぼ同じ周期の安定した流れを確認することができる。この結果より、液溜めの圧力を制御することで作動水の不安定な循環を安定させられることが確認できる。

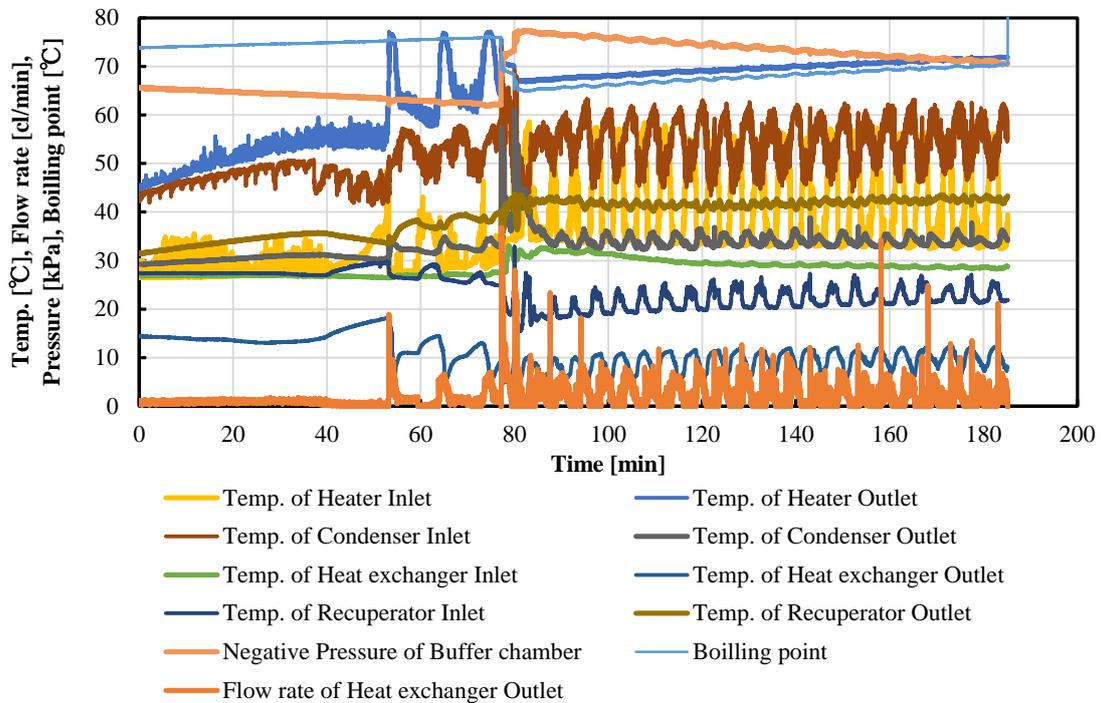


Fig. 4 Experimental results in case of changing the pressure of buffer chamber

4-3-2 圧力制御システム

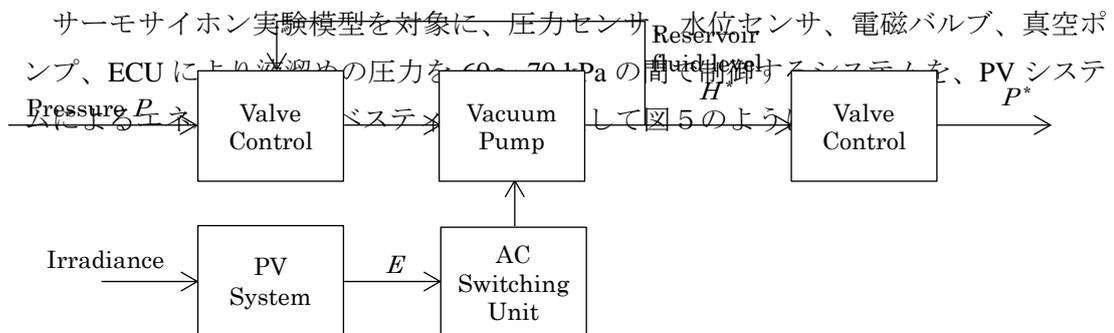


Fig. 5 Pressure control diagram

200 W の真空ポンプを朝夕 5 分程度駆動するものとし、独立型 PV システムの太陽電池容量と二次電池容量を以下のように求められた。標準的な 1 kW の PV システムにおける年間発電量は 1 kWh (1 日当たり 2.74 kWh 相当) であり、1 日に 10 分ずつポンプを駆動するために要するエネルギーは $200 \text{ W} \times 600 \text{ s} = 0.120 \text{ MJ} = 0.0333 \text{ kWh}$ であるので、必要な PV 容量は 12.2 W である。二次電池の充放電効率を 0.8 とすると、15.2 W の PV モジュールが必要となる。バッテリーを 7 日程度の不日照が続いても自立できる容量とすれば、 $(33.3 \text{ Wh} \div 0.9 \times 7 \div 12 \text{ V}) = 21.6 \text{ Ah}$ 程度となり、インバータ効率と自己放電を考慮しても自動車用鉛電池 1 個程度の容量となる。なお、不日照時の熱循環を考慮しなければバッテリー容量をかなり削減できる。

4-3-3 蓄熱システムの検討

蓄熱によりエネルギー供給量を制御して安定な作動水の循環を実現する目的で、サーモサイホンとの親和性があると考えられる蓄熱システムを検討した。日本太陽エネルギー学会誌に“硫化ナトリウムの水和反応による化学潜熱を利用する方式の特性改善 (田中・野口ら, 2015)”が発表されており、反応速度が小さく、繰り返し特性に課題があるものの、70~80 °Cでも蓄熱できるという特徴に注目し、この方式による制御システムを設計している。

5. 今後の計画

サーモサイホン実験模型の凝縮器の性能改善に時間を費やし制御則の開発が遅れているが、来年度は作成したシミュレータの問題点を改善し、非線形システムに適した制御理論を適用して制御システムを構築する。次に、液溜めの圧力を下げて沸点を調整することで安定した熱移動を実現する制御システムを、外部動力を必要としないというサーモサイホンの特徴を犠牲にしないで実現するため太陽光パネルと二次電池でエネルギーハーベスト構成して製作、その有効性を確認する。そして、蓄熱システムに関しては、昼夜の温度差による膨張、収縮を利用して負圧を生成し、圧力を制御するシステムなども含めて検討し、実験によりその性能を確認していく。

6. 研究成果の発表

研究成果の一部は、第 27 回環境工学総合シンポジウム (2017 年 7 月 10 日~12 日) で発表予定。

間歇充電式新電気バスシステムに関する基礎研究 (電気バスシミュレータを用いた路線バスの消費エネルギーに関する考察)

研究者名：機械工学専攻 川島 豪

1. 研究の目的

地球温暖化の原因である二酸化炭素に代表される温室効果ガスを削減することは持続可能な社会を構築する上で重要な課題である。そこで本研究では、地域に分散しているバス停ごとに 20 秒程度の乗客の乗降時間を利用して太陽光で発電された電力を充電しながらバスを運行させる路線バスシステムを開発する。

2. 研究の必要性及び従来の研究

東北地方太平洋沖地震とそれに伴って発生した津波により福島第一原子力発電所が事故を起こし、日本における電力供給のあり方が問われ、再生可能エネルギーの一層の普及促進が求められるようになった。それにより 2012 年より再生可能エネルギーの固定価格買取制度が始まり、本格的に再生可能エネルギーが利用される時代となった。一方で、原子力発電所からの電力供給が滞るなか、石油や石炭による火力発電所から電力供給が増え、二酸化炭素の排出量が増加した。2014 年には省エネルギー、再生可能エネルギーの利用、燃料転換などの努力により減少に転じた（環境省, 2015 年）が、二酸化炭素の削減は喫緊の課題である。このような状況において、公共交通機関は率先して二酸化炭素削減に貢献すべきであると考えられる。

路線バスを電気バスにすれば二酸化炭素の排出を 50%程度に削減できる。さらに、再生可能エネルギーにより発電された電気で運行すれば二酸化炭素の排出を完全に抑えられる。しかし、Li-ion 電池が蓄えられる質量当りのエネルギーはガソリンの約 1/100 で、搭載できる電池の制約から電気乗用車でも 1 回の充電による走行距離は 150 km 程度に留まっており、大型バスでは内燃機関ほどの利便性が得られない。一方、「モーダルシフト」に代表されるように環境面から鉄道輸送が見直されている。鉄道は架線より電力の供給を受けるため蓄電装置を搭載する必要がない。バスではトロリーバスがこれに相当する。しかし、路線全線に張る架線のコスト、架線による大型トラックなどの通行障害、景観への悪影響などの点から、現在、日本では他の車両がほとんど通行せず、環境への配慮が最優先される黒部立山アルペンルートの特設トンネル区間に 2 路線残るのみである。これらの問題を解決するシステムとして、電気バスとトロリー

ーバスの長所を組み合わせた間歇給電式電気車両システムが提案されている。停留所
 にはのみ架線を張り、トロリーバスのように集電装置を有する車両が停留所に停車して
 いるときおよび最もエネルギーを必要とする発進・加速時に架線から電力の供給を受
 けるシステムで、車両には基本的に次の停留所までのエネルギーを蓄えておけばよく、
 搭載する蓄電装置の量を軽減できるシステムである。さらに、架線は停留所だけに張
 られることから、ほかの車両の通行障害となることや景観へ悪影響を及ぼすことのな
 いシステムでもある。

著者らは、路線バスのバス停が広範囲に分布していることに注目し、間歇給電式電
 気車両システムが低密度で分散型の再生可能エネルギーを有効に活用できると考え、
 このシステムを発展させた再生可能エネルギーを利用する間歇充電式新電気バスシ
 ステムを提案してきた。乗客の乗降のためバス停に停車している 20 秒程度の間に、バス
 停周辺に設置された太陽電池などにより発電されたグリーン電力をバスに急速充電す
 るシステムである。その概念図を図 1 に示す。そして、模型実験やシミュレーション
 によりその有用性や実現可能性について確認してきた。

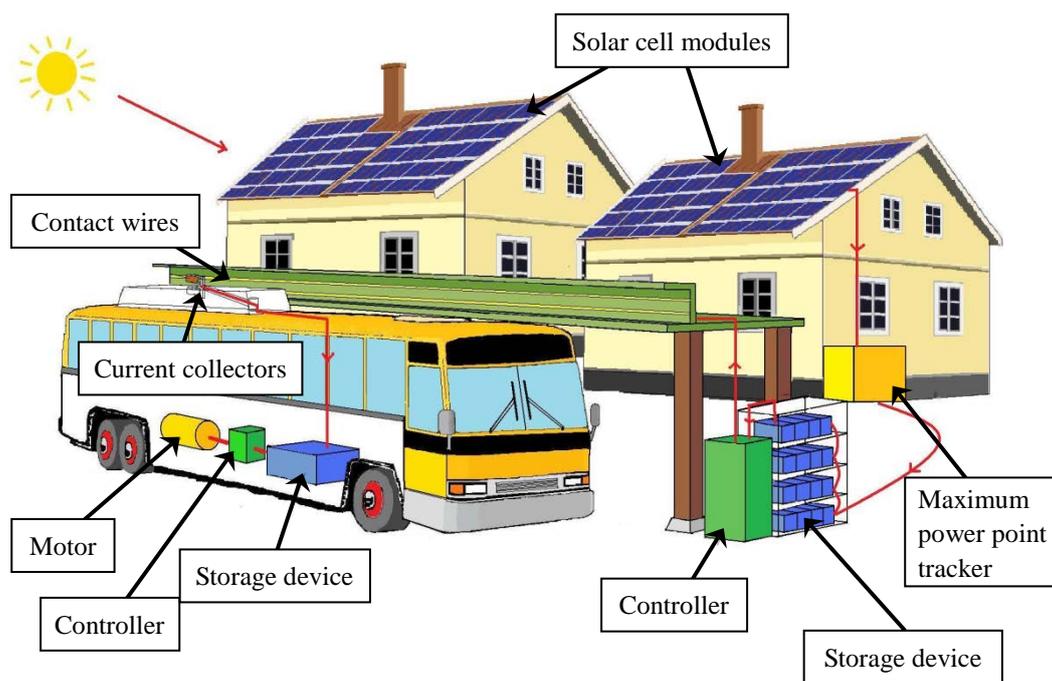


Fig. 1 Illustration of the proposed public transportation system in which an electric bus is charged at every bus stop using power generated from solar energy sources.

類似の交通システムとしては、中国・上海においてキャパシタを搭載したトロリー
 バスによる架線レス交通システムが実用化されている。本研究で提案しているシステ
 ムは、自然エネルギーを利用する点と、バス停に停車中のみならず発進・加速時にも
 電力を供給することで停車時間を短くしている点が異なる。また、日本においても 2008

年春に羽田空港のターミナル間輸送に非接触給電式のハイブリッドバスによる試験運行が実施されたが、乗客の乗降時間に合わせた秒単位の給電には至っていない。また、ドイツの Mannheim でも 2013 年より非接触充電バスの試験運行が実施されている。一方札幌市電において、2007～2008 年の冬にリチウムイオン電池もしくはニッケル水素電池を搭載し、架線のない区間でも電力の供給なしに走行できる 2 種類のハイブリッド式バッテリートラムの試験運転が実施された。これは、架線区間で充電し、無架線区間を蓄電池により走行するシステムで、既存の路線に新たな路線を延長する場合に架線などの設備コストの抑制を目的としたものである。JR 東日本は烏山線に気動車にかわり電化区間とターミナル駅で充電し、非電化区間を蓄電池で走行する蓄電池駆動電車 (ACCUM) を 2014 年 3 月より運用している。

3. 期待される効果

ディーゼルエンジンで駆動している路線バスを、二酸化炭素を排出しない間歇充電式新電気バスシステムに置き換えることで、再生可能エネルギーを有効に活用できるようになり温室効果ガスの排出削減に多大な貢献が期待できる。さらに、本システムにより構築された分散型発電ネットワークは、マイクログリッドさらにはスマートグリッドの中核を成しえ、災害時の非常用電源としての役割も担うことができる。また、エネルギーの「地産地消」を具現化するもので、効率的な再生可能エネルギーによる電力供給にも貢献しうるシステムである。加えて、停留所のみで架線を張るので景観への影響が少ない公共交通機関としても期待できる。将来的には、電気自動車が普及するとそこに搭載されているバッテリーの大量廃棄が始まり問題となる。搭載蓄電装置の量が少ない本システムは、このような環境問題にも貢献できるものである。

4. 研究の経過及び結果

本システムにおける最大の特徴は、バス停ごとに充電するため搭載する蓄電装置の容量を小さくできることである。すなわち、電気バスが実用化できない最も大きな原因である蓄電装置の容積と重量を減らせることである。この特徴を生かすためには、提案している電気バスがバス停間で消費するエネルギーを求め、運転を継続するために必要な最小限の蓄電装置の容量を推定する必要がある。そこで、提案している電気バスがバス停間で消費するエネルギーを計算するシミュレータを、一人乗り電気自動車やEVコンバートしたミニバンの加減速および惰性走行実験の結果を外挿して構築してきた。バス路線の道路情報（距離と勾配）から路線を加速走行・定速走行・減速走行からなる走行パターンの組み合わせに分割（一般的には信号間）し、各パターンでの最高速度、最低速度およびアクセラレータペダルの位置（電気自動車の場合はトルク率となり加速度に関係）を入力し、走行パターンと供給エネルギー、回生エネルギーを出力するシミュレータである。そして、本厚木バスセンターから神奈川工大

学を經由して鳶尾団地を往復する路線バスに関して、路線上の坂の有無、回生ブレーキの使用法の違いによる消費エネルギーをシミュレーションして比較するとともに、バス停における給電システムおよびバスに搭載する蓄電装置などの設計例を示してきた。本年度は、路線バスの乗客数、アクセラレータペダルの最大トルク率が消費エネルギーに与える影響を調べた。その結果の一部を表1に示す。

3ケースとも走行距離がほぼ同じであり、シミュレータの有効性が確認できる。回送など乗客がない場合を想定して車両重量を乗客に相当する質量分として28.7%減らし、かつ走行時間が同じになるよう最大トルク率を調整した場合にはバス停ごとに充電しなければならないエネルギーを13.6%程度減らせること、アクセラレータペダルの最大トルク率を半分に抑えた場合には走行時間は若干長くなるがバス停ごとに充電しなければならないエネルギーを2.5%程度減ることが明らかになった。

これらの結果より、アクセラレータペダルの最大トルク率も重要な設計パラメータであることがわかる。すなわち、バス停ごとに充電するエネルギーを抑えるには、電気バスも周囲の車の流れを考慮しながら省エネ運転をする必要があるといえる。

Table 1 Simulation result changing the weight and the maximum torque rate

| Weight [kg] | Maximum torque rate | Travel distance [km] | Travel time [s] | Charging energy at every bus stop [MJ] |
|-------------|---------------------|----------------------|-----------------|--|
| 15,306 | 1 | 16.44 | 3164 | 2.42 |
| 10,906 | 0.58 | 16.44 | 3164 | 2.09 |
| 15,306 | 0.5 | 16.44 | 3205 | 2.36 |

5. 今後の計画

非接触で電力を送電する非接触給電が精力的に研究されている。架線やパンタグラフを用いない電気バスへの給電方法として、本システムへの適用が今後の課題である。特に、提案しているシステムの特徴の1つでもある、加速時にも非接触で給電できるシステムの開発を目指していく。

電気バスシミュレータをもとに電動バイク用シミュレータを構築し、授業時間に大学の太陽電池で充電して本厚木駅と大学の通学用に用いることで、通学時の温室効果ガスの排出削減に貢献できるレンタル電動バイクシステムについてもCO2プロジェクト等などで検討していく予定である。

6. 研究成果の発表

- (1) Takeshi KAWASHIMA, " Basic research on an electric fixed-route bus system with green fast charging at every bus stop using a simulator", *Bulltin of the JSME, Mechanical Engineering Journal*, Vol.4, No.2 (2017), pp.1-13, DOI: 10.299/mej.16-00452.

競技用ソーラーカーの後輪操舵システム

研究者名：自動車システム開発工学科 藤澤徹，川口隆史

1. 研究の目的

学生が競技用ソーラーカーを実際に設計し，製作する神奈川工科大学ソーラーカープロジェクトチームの活動の一端を紹介し，エネルギーとそれに関連する工業技術について学ぶ事例として，後輪操舵することの有効性を明らかにしたい。

2. 研究の必要性及び従来の研究

我々が利用している，或いは，利用可能なエネルギーは，元々太陽エネルギーに由来するものが大半であり，太陽エネルギーと関連付けてエネルギーについて考察することは，教育的に意味があると思われる．競技用ソーラーカーを製作することで，エネルギー教育の一環として，いかに太陽エネルギーを効率よく利用することが出来るかを考察する機会を学生に与えられる．また，全体のエネルギー収支についても配慮しなければならず，エネルギーを効率良く使うための技術について考える必要に迫られ，太陽エネルギーと他の色々な分野との関連を自然に意識することになる．

3. 期待される効果

ここで採り上げる競技用に製作されたソーラーカーは，World Solar Challenge (WSC) に向けて設計，製作され，2013年に開催されたWSCのアドベンチャークラスに出場した．図1に示す車両がそれで，カーボンモノコックと前2輪後ろ1輪を有し，後輪の2.0 kW インホイールモータを原動機とし，1.3 kW の太陽電池システム，5.2 kWh のリチウムイオン電池を搭載していた．

2013年のWSCの終了後，ソーラーカープロジェクトのメンバーは，車両の完成度を上げるための改良に取り掛かった．レースでは，いかに，費やすエネルギーを



図1 神奈川工科大学ソーラーカープロジェクトチームが設計，製作し，Hidden Valley Motorsports Complex (Darwin, Australia) で走行するWSCに出場したソーラーカー 2013年10月撮影

抑制するかが鍵である。エネルギーを節約するために重要な走行抵抗を減らす方策を考え、その答の一つとして、後輪も舵を切れるように後輪操舵システムをソーラーカーに導入することにした。同じ旋回半径で定常旋回する場合、後輪でも舵を切ることができれば、前輪の舵角を小さくすることができ、前輪の周りを覆うスパッツ幅を狭められるので、空力抵抗を低減できることが予想される。

4. 研究の経過及び結果

大会のレギュレーションに定められた回転半径でカーブを曲がるために、後輪の舵角に対して必要な前輪の舵角を求める。図2における、 α, γ, T, W を与えて、

$$r_0/T = p / \cos \tan^{-1}((1 - 1/p) \tan \alpha) \quad (p \equiv (W/T + \tan \alpha/2) / (\tan \alpha + \tan \gamma) + 1/2)$$

を計算した。その結果を図3に示す。ただし、 $T = 1300 \text{ mm}$, $W = 2000 \text{ mm}$, $W/T = 1.54$

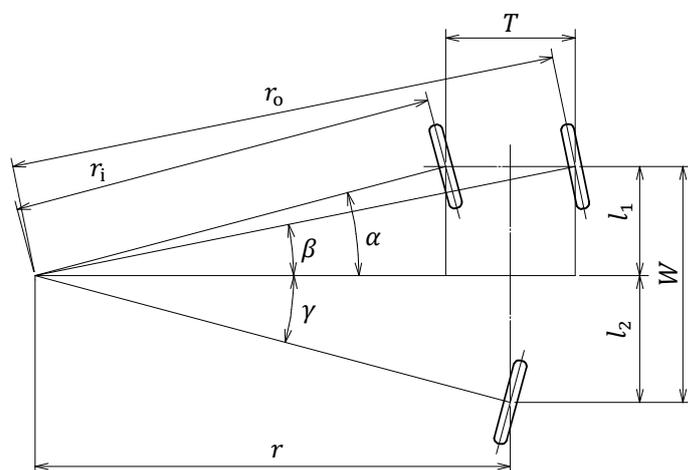


図2 前2輪後ろ1輪を有する車両が定常円旋回したときのタイヤの配置、舵角 α, β, γ と旋回半径 r, r_i, r_o の幾何学的関係を示す平面図

である。大会のレギュレーションでは、車道と歩道間に設けられた縁石から反対側の縁石までの距離が16mとされており、この幅の半分8mでUターンをしなければならない。このことから、 $r_0/T < 8/1.3 = 6.15$ が要求される。この要求を満たすためには、後輪の舵角が 9° であれば、前輪の舵角は 7.5° で足りる。後輪操舵をしなければ、前輪の舵角は、 18° 程度必要であり、この差でスパッツの幅を狭められることになる。

スパッツを2次元柱状流線形対称翼とみなし、スパッツの抗力係数を求めてみる。まず、ソーラーカーの走行速度 U を代表速度とし、翼の弦長 c を代表長さとした Reynolds 数 $Re \equiv cU/\nu$ を求める。 ν は、空気の動粘度である。 $U = 22 \text{ m}$ (80 km/h), $c = 1.2 \text{ m}$, $\nu = 1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ であれば、 $Re = 1.8 \times 10^6$ となる。

タイヤの直径と幅を D, B とすると、スパッツ内部の空洞幅は、最低 $D \sin \alpha + B \cos \alpha = 174 \text{ mm}$ ($\alpha = 7.5^\circ$), 269 mm ($\alpha = 18^\circ$) 必要になる。そこで、スパッツの外側の幅を $d = 190 \text{ mm}$ ($\alpha = 7.5^\circ$), 285 mm ($\alpha = 18^\circ$) とした。よって、図4から抗力係数：

$$C_D = \begin{cases} 0.070 & (\alpha = 7.5^\circ) \\ 0.060 & (\alpha = 18^\circ) \end{cases} \quad \left(\because d/c = \begin{cases} 0.16 & (\alpha = 7.5^\circ) \\ 0.24 & (\alpha = 18^\circ) \end{cases} \right)$$

が得られる。空気の密度を $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ とし、スパッツの前面投影面積を A として、抗

力 F_D を求めた：

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho U^2 A = \begin{cases} 0.070 \times 1.2 \times 22.2^2 \times 0.190 \times 0.308 / 2 = 1.21\text{N} (\alpha = 7.5^\circ) \\ 0.060 \times 1.2 \times 22.2^2 \times 0.285 \times 0.308 / 2 = 1.56\text{N} (\alpha = 18^\circ) \end{cases}$$

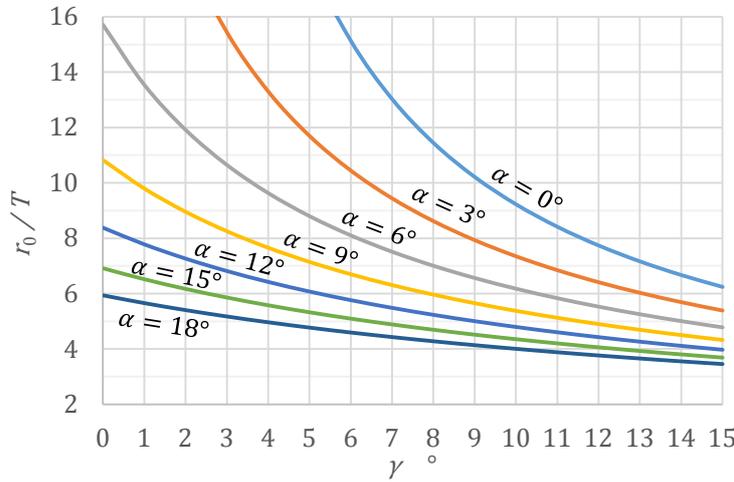


図3 前2輪後ろ1輪を有する車両が定常円旋回したときの無次元化された旋回半径 r_0/T ($W/T = 1.54$)

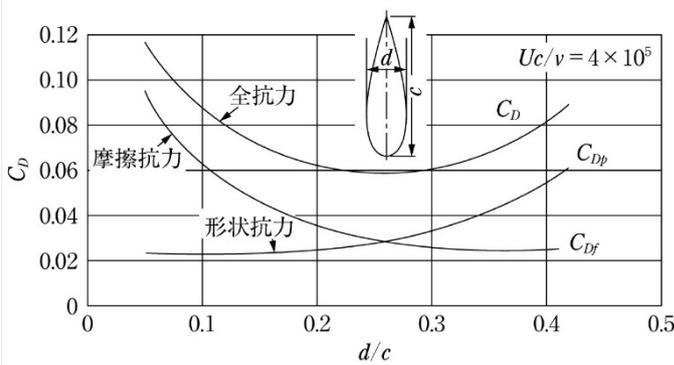


図4 2次元柱状流線形対称翼の単位長さ当りの抗力係数 (日本機械学会, 機械工学便覧 α 4編 流体力学)

すれば、 $12\text{V} \times 1\text{A} \times 12\text{s} / 0.70 = 206\text{J}$ のエネルギーを使うことになる。2013年に開かれたWSCでは、コース上に26箇所の曲がらなければならないコーナーがあるので、 $206 \times 26 = 5.36 \times 10^3\text{J}$ を使うことになる。

後輪操舵システムの有無がエネルギー消費に及ぼす影響について検討する。レースの走行距離は、3008kmで、前輪のスパッツが二つあるので、スパッツの幅が広い時の抗力と狭い時の抗力の差を2倍して、走行距離を掛けて後輪操舵システムがある場合の走行抵抗の減少分： $2 \times (1.56 - 1.21) \times 3008 \times 10^3 = 2.11 \times 10^6\text{J}$ が算出される。これをレース中に操舵

試験的に製作された後輪操舵システムは、図5に示す減速機付直流モータが駆動するボールねじアクチュエータとストロークセンサ(図5に記載されていない)、スイングアーム、マイクロコントローラ、モータドライバから構成されている。ドライバが、ボタンを押すことにより右または左に曲がる指示を与えると、それぞれに応じた目標値の値が制御システム

に入力される。フィードバック制御が働いて、モータを正転または逆転してボールねじアクチュエータの両端間の距離を所定の値まで変える。ボタンが押されていない場合は、舵角が0になるように目標値が入力される。

このアクチュエータを駆動するモータの消費電流を測定した結果を図7に示す。モータの電圧は12Vなので、1回コーナーを曲がると、舵を切って戻してで、 $2 \times 6\text{s} = 12\text{s}$ を要し、効率を70%と仮定

IT を活用した創生電力マネージメントシステム

研究者名：情報工学専攻 田中 博

1. 研究の目的

2つの観点からの学内電力マネージメントへの寄与を目指す。

(1) 学内使用電力のモニタと電力利用の最適化

学内使用電力のリアルタイムモニタと最適な電力利用への寄与

(2) 人力発電の提案とシステム開発

ダイエット、健康志向の高まりがあり、ジョギング愛好者などが増加している。また、運動をサポートする各種健康機器の販売も広く展開されている。一方、循環型社会、サステナブルな社会の実現という言葉で表現されているように、太陽光を初めとした化石燃料に依存しない再生可能エネルギーの利用の拡大が社会的に求められている状況にある。これらの周辺状況を踏まえ、学生ボランティアのマンパワーを有効に活用したスモールスタートとして、従来の使い捨て型の乾電池から、充電型の再利用可能な蓄電池への充電とその利用や比較的小電力で駆動させる装置の電力を自力で賄うシステムを提案、開発する。

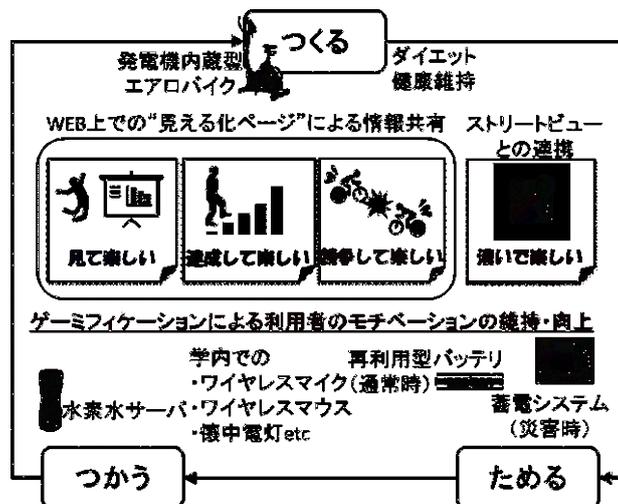


図1 提案システム(2)の構成

2. 研究の必要性および従来の研究

一般のエアロバイクは、ユーザの健康志向に対応するためのものであり、エアロバイクの利用とカロリー消費という関係であり、本システムの検討対象ではない。一方、発電型のアロバイクは、既にイベント会場などで出し物の一つとして使用されている実績が多々ある。しかし、いずれもイベントという一時的な利用に限定されており、定常的に利用するシステムには至っていない。それは一時的にライトを点灯させる、テレビをつけてみるという発電体験に過ぎず、発電電力を効率よく蓄積すること、そしてその定常的な利用を検討していないことによるためと思われる。したがって、本システム開発では、・発電電力の効率的な充電と蓄積、・発電電力の定常的な利用方法の確保、

発電する→貯める→使う、というサイクルを定常的なものとするための体制づくりが必要となると考えられる。

3. 期待される効果

目的(1)に対しては、節電を含めた電力利用に対する意識の向上、最適な電力利用のためのデータ収集に寄与する。(2)に関しては、1章の研究の目的で述べたように、楽しみやエンターテインメント性を確保することにより、定常的に利用してもらえることになれば、安定して充電電池の確保が可能となる。学内でこれまで利用していた使い捨て型の乾電池から充電型の電池への切り替えや新たに設置する機器の電池を充電型とすることにより、極めて小さなことではあるが環境保全、持続社会の実現に寄与できる。二次的な効果として、健康促進にもつながる可能性がある。

4. 研究経過および結果

H24年度に開発着手した「学内使用電力の見える化」システムの運用を継続してきた。また、H26年度に着手した「人力発電マネジメントシステム」に関しては、ユーザであるECO推進チーム“みどり”の要望を踏まえて、H28年度に二次試作システムを設計、開発し、新たな運用を開始した。以下にH28年度に実施した主なポイントを示す。

4.1 発電バイクの開発

1次システムの発電バイクは、利用時の騒音が問題となり、運用に大きな制約があった（授業がある時間帯での利用を控えていた）。また、ペダリングの休止にともない、発電機の回転も停止し、現実の自転車を漕ぐ感覚との乖離があり、快適性の観点からの課題があった。このため、発電機の種類やフライホイールを新規開発システムに利用し、課題を解決した。

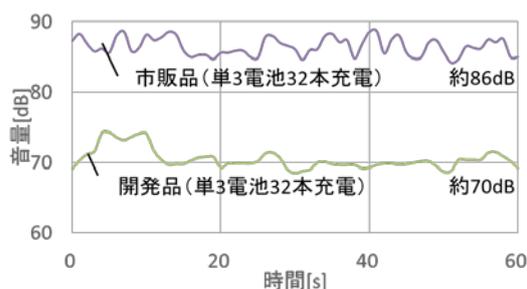


図1 発生騒音の比較

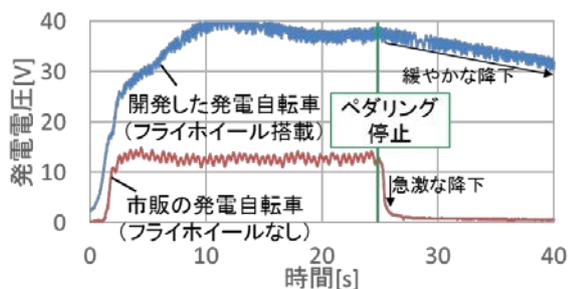


図2 ペダリングと発電電圧

4.2 発電情報共有システムの開発

発電電力をセンシングし、それをクラウド内に格納、そしてWEBページでその情報をモニタするシステムを開発した。これに関しては、<http://kait-humanpowergeneration.appspot.com/>にて公開している。

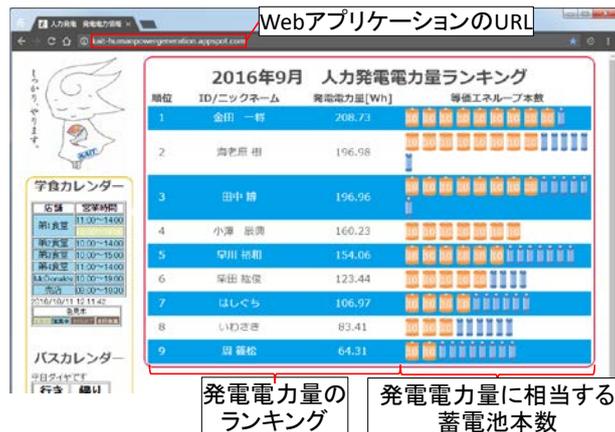


図 3 発電電力量共有システムの出力画面の一部

4. 3 発電情報を用いた VR システムの開発

前システムでは、発電電力量に応じて移動距離を算出し、StreetView の画像情報を PC やプロジェクターに表示していた。消費電力やリアリティの観点からの課題があった。新システムでは、Unity とスマートフォンを用いて、スマートフォンの画面を視点を変えた 2 画面を表示することによる仮想現実 (Virtual Reality) システムとして実現した。



図 4 発電電力量に応じた画面遷移と視点を変えた 2 画面による VR

4. 4 ECO 推進室“みどり”と連携したシステム運用

システムの全景を図 5 に示す。平成 28 年 12 月から ECO 推進室“みどり”による定常運用を行っている。12 月、1 月、2 月、3 月の総発電電力量 (等価 eneloop 本数) は、301Wh (132 本)、406Wh (178 本)、262Wh (115 本)、471Wh (204 本) である。



図 5 システム全景

5. 今後の計画

H29年度は、H28年度に開発し、現在ECO推進チーム“みどり”で運用しているシステムの運用と保守の支援を継続するとともに、より利用を活性化させる。KAITアリーナのトレーニングルーム内への設置と、現在の eneloop への充電から災害時での利用を想定したバッテリーへの充電を可能とするシステムの開発を行う。

6. 研究成果の発表

学会発表

(1)Tatsuki Ebihara, Kazuya Yashiro, Shigenori Ioroi, Hiroshi Tanaka, “Development of Information Management and Entertainment Application using Smartphone and VR Technology for Human-Powered Generation System”, The Fifth Asian Conference on Information Systems (ACIS2016), pp.157-160, Krabi, Thailand

(2)海老原 樹, 谷代 一哉, 五百蔵 重典, 田中 博, 定常利用を目的とした情報技術と連動した人力発電システムの開発, HCG シンポジウム 2016, HCG2016-B-8-4, pp.480-486

展示会

(1)CEATEC JAPAN 2016、 2016年10月4日-7日、ユニバーシティエリア、小間番号 4P53-01

(2)平成28年度あやせ環境展、2016年11月20日

に“発電自転車と仮想現実（VR）を連動させた人力発電マネジメントシステム”として出展

新聞掲載

(1)日刊工業新聞 2016年12月28日 人力発電システム開発 ー神奈川工大ー

Solar EV に多面体・多方位設置した太陽電池モジュールの 最大出力動作点追従制御に関する研究

研究者名：自動車システム開発工学科 藤澤 徹

1. 研究の目的

本研究では、モビリティにおける CO₂排出量の削減とエネルギー自給率の向上を意図して Solar EV の開発を目的としている。車両のルーフやハッチなどに貼付した太陽電池モジュールと二次電池から電力を自給する一例として、多面体・多方位における太陽電池モジュールの最大電力点追従制御に関する研究を行うものとした。

2. 研究の必要性及び従来の研究

電気自動車では外部電源による充電で走行時のゼロエミッションと電源の多様化を達成し、Well to Wheel のシステム効率を増大する点が特長であった。しかしながら、充電に時間を要する点やインフラの整備不足、災害時などの電源喪失への対策が未解決となっていた。さらに、ソーラーカーではエネルギー性能に特化しすぎるあまり、コストやデザイン、実用性において社会に普及しづらい状況が続いていた。したがって、本研究では、太陽電池も利用する Solar EV によって電力の一部自給とネガティブ・エミッションを達成する電気自動車を提案している。従来の研究はルーフに設置した太陽光発電システムの最大電力点追従制御手法に特化したものであり、本研究では季節や時刻によらず二次電池を充電する一定の電力が得られることを意図して研究を行うものとした。

3. 期待される効果

電力自給率（太陽依存率）の向上とエネルギーハーベスティングによるネガティブ・エミッションが期待できる。また、多面体・多方位設置された太陽電池モジュールでは、季節や時刻によらず一定の電力が得やすいという効果が期待できる。

太陽熱サイフォンでは外部電源を必要としない熱移動が特長であった。しかしながら、真空度を維持することが熱媒の自己循環の前提条件となっており、そのための動力は外部電源に依存するという矛盾があった。したがって、本研究の成果を応用すれば、太陽光発電によるエネルギーハーベスティングによってアクチュエータを駆動し真空度と熱媒循環を保つ効果が期待できる。

4. 研究の経過及び結果

ソーラーEVの荷台に設置した直方体形状（縦 横 高さ）のFRP製BOXの上面・左面・背面・右面に太陽電池モジュールを貼り付けた状態で、昇圧型DC-DCコンバータによる最大電力点追従制御装置（MPPT）を4つ用いた分散型の電力制御システムを構築した（Fig. 1, Fig. 2）。負荷は12V, 27Ahの制御弁式鉛蓄電池（VRLA）の4直列または2直列とした。



Fig. 1: Solar EV (EV conversion of HONDA GYRO CANOPY)

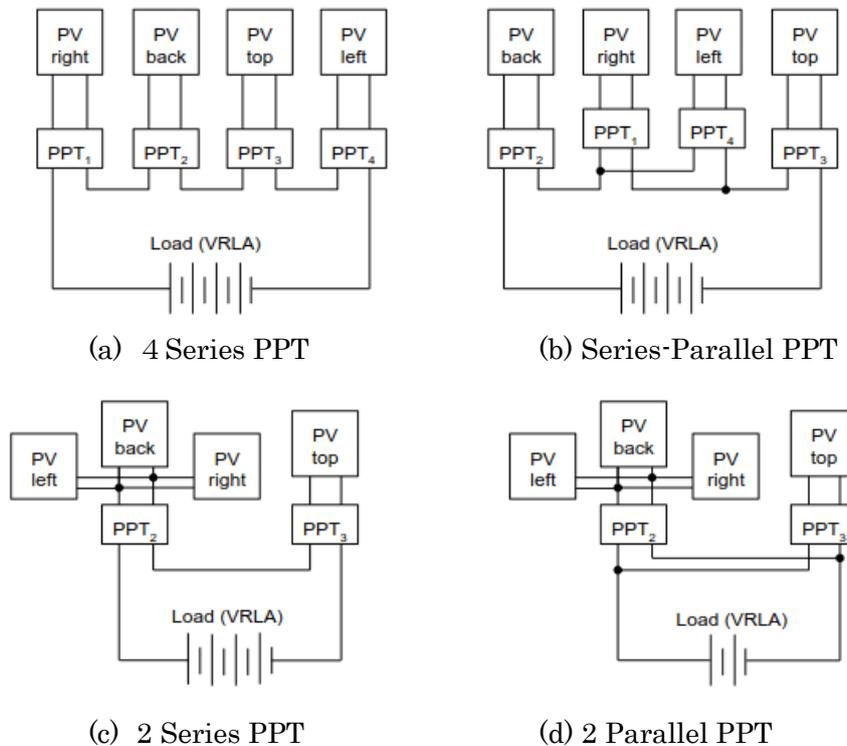


Fig. 2 分散型 PPT システム

Fig. 3 は直並列 PPT システムを用いた充電の実測例である。水平面日射の平均値あたりの出力が最も得られる構成となった。Fig. 4 は 2 並列システムの実測例であり，時間帯や日射の変動によらず，一定の出力を得やすいことが分かった。電源電圧の低さが問題にならないければ，悪くない選択肢のひとつである。

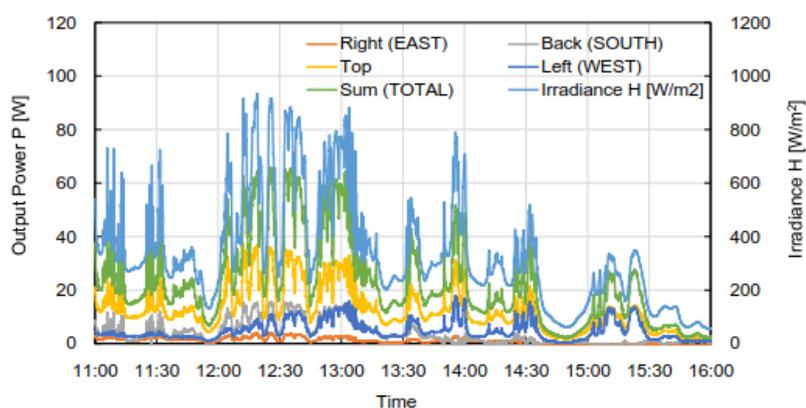


Fig. 3 Output power of PV system on Sep 26, 2016 (Series-Parallel PPT system)

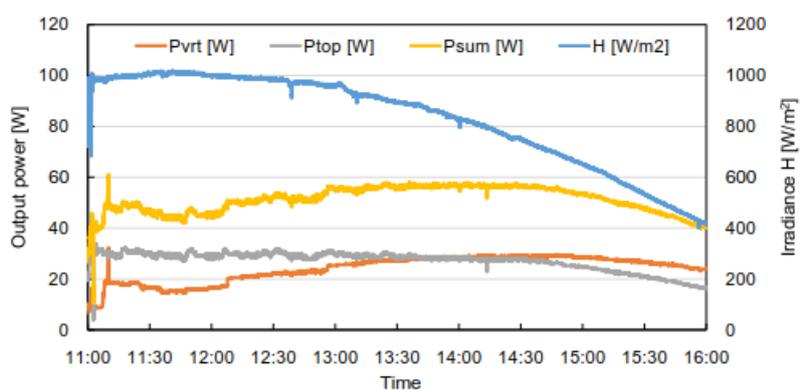


Fig. 4 Output power of PV System on Aug 26, 2016 (2 parallel PPTs for a low voltage VRLA system)

Table 1 実験結果の比較

| PPT System | Series on 27th Sep | Series-Parallel (left/right) on 26th Sep | Series (top, vertical) on 24th Aug | Parallel (top/vertical) on 26th Aug |
|-----------------------|--------------------------------|--|--|---|
| Average values | | | | |
| Horizontal irradiance | 389.6 W/m ² | 332.7 W/m ² | 560.1 W/m ² | 811.5 W/m ² |
| Charged Power | 23.7 W | 22.1 W | 25.1 W | 51.1 W |
| P/H | 6.1% | 6.6% | 4.5% | 6.3% |
| | (Scattering irradiance effect) | | | (Low voltage load) |

Table 1 は屋外充電実験で得られた水平面日射強度と充電電力の平均値 H および P

をそれぞれのシステムに対して示したものである。結果として、並列ないし直並列システムの充電能力が直列システムのそれを僅かに上回る結果となった。直列システムの出力が予想外によいので、スルーモード（低出力時のバイパス機能の一種）と昇圧比の関係などを解き明かすことは今後の課題である。

5. 今後の計画

本研究の太陽電池には、両面受光型の太陽電池を用いているが、スペースの制約があり、その特長を活かす裏面条件（透過・反射条件）にはしていない。その点を考慮した場合のシステム構成も研究課題の一つである。また、分散型の電力制御では、個々の出力を協調制御するメリットと制御なしのメリットとが未解明のまま残されている。

走行時や日射の偏在条件に対する展開も今後の計画の一つである。日影や日射変動に対する動的な系統切り替え制御を行うことで、出力電力の向上と最適化が期待できる。

外部動力を必要としないトップヒート型太陽熱サイフォンの真空度を維持するための、エネルギーハーベスティングによる真空ポンプとアクチュエータの駆動においても、システム効率の改善をする予定である。

6. 研究成果の発表

11th ISES EuroSun 2016 における **Building and Solar Industry** に関する国際会議での **Abstract** 受理により、10月にスペインで口頭発表を行った(2016年10月14日)。同時に、フルペーパーを投稿した結果、**Reviewer** の査読結果が5月に届き、英文校正と背景・展望の修正を経て返送した。現時点で掲載決定の連絡はないが、採択される可能性がある。

2017年4月に申し込んだ ISES 国際会議では、別の **Solar EV** の成果に関する **Abstract** が受理され、10月29日～11月2日にポスター発表を行う予定である。

平成28年度 重点配分 成果報告書

太陽光発電システムのリアルタイムパネル診断システムの開発

研究代表者 電気電子情報工学科 板子一隆

共同研究者 電気電子情報工学科 工藤嗣友

ホームエレクトロニクス開発学科 黄 啓新

1. 研究の目的

日本国内での太陽光発電のコストは普及と共に低下しており、第一のグリッドパリティ(電気料金と太陽光発電の発電コストが等しくなる時点)は既に達成された。日本では売電を目的とするメガソーラーについては既に飽和状態に達してきているが、政府の指針となるPV2030+の太陽光発電ロードマップにおいて今後蓄電設備と併用したオフグリッドシステムに向かっていく一般家庭用の太陽光発電システムでは、その導入が堅調に進んでおり、依然として本事業への新規参入メーカーからの技術開発相談が後を絶たないのが現状である。現状において、これら太陽光発電の効率を下げる最も大きな要因は太陽電池パネルの故障である。太陽電池パネルの不良は、現時点で国内出力合計約30GWと期待されている太陽光発電量が未達となる危険性を含んでおり、その原因に関しては、多くの研究がなされ、原因の一つがホットスポット現象によることが明らかになっている。しかしながら、その検査方法としては、太陽電池パネルに組み上げた状態では、確実な方法としてドローンなどを用いて発熱を赤外で観察する方法などに限られ、電氣的に効率よく検査する手段がなく、そのためユーザーや設置業者は期待通りの発電量が得られなくても対応するすべがなかった。最も困難にしているのがパネルのセルごとに測定端子がなく各セルの状況を電氣的に測定することが出来ないことであった。そこで、研究代表者は、太陽電池パネル内のセルレベルでの故障をセル毎の測定端子がなくとも電氣的に検出する方法・システムを開発し(特許出願済 特願 2013-33614)、プロジェクトを用いて検出する方法を検討した(平成26年~28年科研費一般研究Cの支援により実施)。この方法は太陽電池パネルの出荷検査・受入検査などでの用途が主となっている。しかしながら、ホットスポットは、設置前に問題がなかったとしても設置後に様々な要因で結晶に欠陥を生じることがあり、後々にホットスポットが発生するケースもあるため、設置後にも定期的に検査できることが関連業界で強く要求されている。

そこで本研究では、設置後に運用しながらパワーコンディショナを通してパネルの電氣的特性(電流・電圧特性: I-V特性)を監視し、ホットスポット現象等をリアルタイムで診断できるシステムを新たに構築することを目的としている。

2. 研究の必要性及び従来の研究

本研究では、これまで実現出来ていなかった太陽光発電システムの設置後に、運用しながらパワーコンディショナを通してパネルの電気的特性(I-V 特性)を監視し、ホットスポット現象等をリアルタイムで診断できるシステムを構築することを目的としている。

太陽光発電システムは FIT 制度で普及しており、一般家庭ではすでに 160 万件を超える世帯で導入された。研究代表者はこれまで太陽光発電(PV)システム関連の研究課題として、より効率の高い発電システムを実現するための新しい MPPT 制御方式” スキャン法” を開発し、改良を行い実用化に成功している。さらに、このスキャン法を応用し、定期的に行われるスキャン動作時に得られる I-V 特性から異常状態を検出する方法を提案し、特許を取得している(US 9,143,082 B2(2015))。

本研究ではこの特許技術をベースとして、まず、第一段階として①ホットスポット発生時特有の I-V 特性を分析し、正常状態と区別できるような基本手法を開発することを目標とする。次に、②この開発された手法を DC-DC コンバータの制御システムに組み込んで、各種条件下において判定が可能であるかの実証実験を行う。最終段階として、③本手法を搭載したパネル毎に接続する高効率なパワーコンディショナ(パワコン)を開発し、そのパワコンから出力される I-V 特性をモニタリング(表示)するための通信システムを構築する。さらに LAN 通信プロトコルとして ECHONET Lite を採用し、HEMS に対応した次世代型 PV 発電システム実現の可能性について検討することを目標とする。

3. 期待される効果

本システムの開発により、設置後に運用しながらパワーコンディショナを通してパネルの電気的特性(電流・電圧特性：I-V 特性)を監視し、ホットスポット現象等をリアルタイムで診断できるため、異常が発生した場合に速やかに対処することが可能となる。これまで、ホットスポットを発見出来ずに火災が発生した事例が多発しており、これらの問題を解決することが可能となる。

4. 研究の経過及び結果

前年度は、パネル1枚についてホットスポットを検出できることを明らかにした。本年度は、複数枚のパネルが直列に接続されたストリング構成時のホットスポット検出手法について検討し、正常状態と区別できるような基本手法を見だし、診断に利用できる技術を開発した。さらに、この開発した手法を DC-DC コンバータの制御システムに組み込んで、各種条件下において判定が可能であるかの検証を行い、国際学会や展示会にて成果発表を行った。

4. 1 ストリング構成時のリアルタイムホットスポット検出方法の原理

(1)ストリング接続への拡張 太陽電池モジュールの I-V 特性において、太陽電池電圧 V_{PV} の低電圧 V_1 と高電圧 V_2 に対応したそれぞれの太陽電池電流 I_{PV} の値 I_1, I_2 の差を短絡電流 I_{SC} で除した電流変化率を求める方法を提案する。

$$V_{cl}=V_{OC} / n$$

$$V_1=V_{OC} - V_{cl} \tag{1}$$

$$V_2=(V_{OC} - V_{cl}) / 2$$

$$\text{電流変化率} = (I_1 - I_2) / I_{sc} \tag{2}$$

ここで、 V_{cl} はクラスタごとの電圧、 n は太陽電池モジュールのクラスタ数、 V_{OC} は開放電圧である。これがある判定値を超えた場合にホットスポットが発生していると判別が可能と考えられる。しかし、図 1 に示すように太陽電池ストリングのモジュール数を増やすと正常のストリングの I-V 特性の高電圧側の電流の変化が緩やかになり、ホットスポットがある場合と正常な場合の区別が難しいことが明らかとなった。同図はモジュール 2 枚、3 枚、4 枚の I-V 特性を示している。そのため、正常なセルの I-V 特性と欠陥セルを含む場合の I-V 特性を区別する方法を明らかにしたので以下に示す。

(2)面積から判別する方法の提案

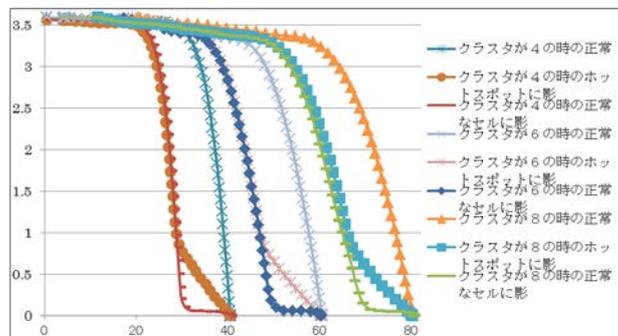


図 1 モジュール複数の I-V 特性

正常な I-V 特性と欠陥がある I-V 特性を区別するためにスキャンした太陽電池モジュールの I-V 特性の面積比を以下の式で求める。

$$\text{面積比} = \text{I-V 特性の面積} / \text{最大面積 (開放電圧} \times \text{短絡電流)} \tag{3}$$

表 1 面積比

| | 正常 | ホットスポットセルに影 | 正常なセルに影 |
|---------|------|-------------|---------|
| クラスタが 4 | 0.89 | 0.68 | 0.66 |
| クラスタが 6 | 0.86 | 0.72 | 0.70 |
| クラスタが 8 | 0.86 | 0.75 | 0.72 |

表 1 は図 1 における I-V 特性の面積比を示している。同表の条件では面積比が 0.8 を超えると正常、以下になるとホットスポットの発生を含む異常状態であると判断できることが分かる。この判別によって異常と判断された場合、(2)式からホットスポットが発生しているかどうかを判別することが出来る。

そこで、企業のご協力も得て、図 2 に示すように、本提案手法を搭載したリアルタイ

ムホットスポット検出機能付パワーコンディショナ(パワコン)を開発し,そのパワコンから出力される I-V 特性をモニタリング(表示)するための通信システムを構築した.これにより,実フィールドでの実験を行うことが可能となった.

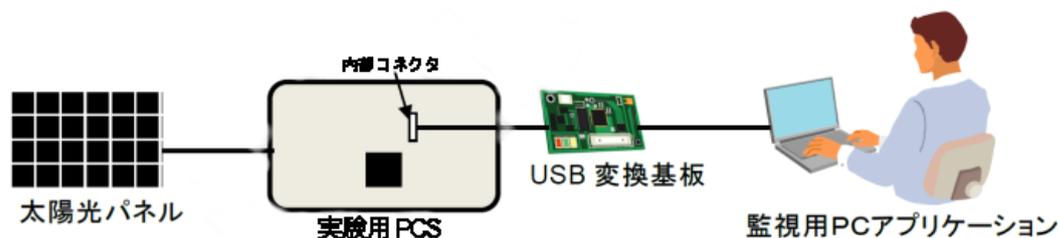


図2 リアルタイムホットスポット検出システムを持つパワコンの開発

以上の検討より,本研究プロジェクトの目的をほぼ満たすことのできる成果を得ることができたと考えられる.

5. 今後の計画

今後は,本研究プロジェクトで開発したパワコンを用いて,実フィールドでの検証を行っていく予定である.さらに,H科一色教授のご協力も得て HEMS に対応させることの可能性を検討し,次世代型 PV 発電システムの実用化を目指す予定である.また,この成果を PV Japan 2017 で発表する予定である.

6. 研究成果の発表

〈学会・展示会〉

【ジャーナル・学会誌】

1) K. Itako, B. Hossam, T. Kudoh and Q. Huang, “Real Time Hotspot Detection System Using Scan-Method for PV Generation System”

Journal of Energy and Power Engineering (USA) Vol. 10, No. 6, pp. 378-383 (2016) (査読付: 添付資料)

【国際学会】

1) K. Itako, B. Hossam, T. Kudoh, Q. Huang, “Real Time Hot-spot Detection System Using Scan-Method for PV String Generation System”

Proceedings of The International Conference on Electrical Engineering 2016. 7, No. 90169 (6pages) (査読付: 添付資料)

【展示会】

- (1) 2017 年 川崎国際環境技術展において研究成果を発表
- (2) 2016 年 スマートコミュニティ Japan において研究成果発表
- (3) 2016 年 PV Japan において研究成果発表
- (4) 2016 年 イノベーション Japan に採択, 研究成果を発表

塗料を用いた防除雪氷対策の構築と検証

工学部 機械工学科 木村 茂雄

工学部 機械工学科 山岸 陽一

創造工学部 ロボット・メカトロニクス学科 兵頭 和人

基礎・教養教育センター 栗田 泰生

1. 研究の目的

現状での新規着氷雪防止策として加熱法（電気ヒータ：例えば B-787 主翼）と物理化学法（塗料）があるが、この両者の併用による策の提案・実践はなされていない。特に航空機分野では三菱 MRJ に見られるように多くが依然として古典的な策の適用に留まっている。本研究では、こうした観点から、電気ヒータによる加熱法と超撥水性塗料による表面性状改質の組合せによる方式（物理化学的方法）を採用し、加熱量・加熱法および塗装範囲（親水性面と超撥水性面との組合せ：ICE-WIPS と呼称）の最適化を図る。具体的には、物理化学的手法（表面性状改質：撥水/親水性面の適切配置）と電気ヒータによる加熱法により、翼上の着氷防止策が従来手法に比して効率的であることを風洞試験により実証する。また、併せて、加熱法の検討に不可避である翼表面上の熱伝達係数を着氷風洞試験を行うことで求める。

2. 研究の必要性及び従来研究

現在研究代表者はこれまでに寒冷環境下での構造体上への着氷雪問題に関係した国内外の各種共同研究に参画してきた。これらの研究から、現状の把握と問題点の指摘は、本研究の対象とする航空機、風力タービンの分野では概ねなされたと判断できるが、それでも未だ有効な手段がない、或は、より効率的（機能・経済面で）な手法の構築が求められている状況にあることが理解される。こうした中、防雪氷性塗料塗布による対策の検討が世界的に始まってきたが、現状、それ自身で防雪氷を完結しえる程度には至っておらず、化学的見地からもその実現は非常に困難であると考えられる。それ故、当該塗料は他の手段と併用されることで着氷雪防止に寄与することとなるが、ここで問題となるのが、塗料開発とその応用に際する両者の境界（橋渡し）の研究が殆どなされておらないことにある。本研究は塗料の航空機や風力タービンへの適用を念頭に、そこで発生する問題を抽出し、問題解決に必要な基礎知見を得ることを目的とするため、今後の同種塗料の利用に際し広く貴重な情報提供が可能となると考える。また、着氷風洞を有し、またこれまでの経験・知見、および他研究機関との連携も可能であることから、研究遂行の実行性は高くあると判断する。

3. 期待される効果

寒冷環境下での航空機翼上の着氷防止は安全かつ高効率な運航に不可欠である。近年は「電気ヒータによる加熱＋塗装による表面性状改質」手法への注目・期待が高まりつつあるものの、当該手法を採用する場合、適切な塗料の選択、塗装範囲、加熱範囲・温度・サイクルなどの因子を適切に選択することが求められる。しかしながら、着氷防止塗料に関する基礎的な研究の進捗に比して、その実用性を考慮した翼への展開に関する研究は極めて遅いのが実情である。本研究では、実験室レベルとは言え、実際の飛行環境下において独創性の高い防氷計画を実現し、その効果を実証したことにより、当該手法の今後のさらなる展開が期待される。

4. 研究の経過及び結果

4.1 試験用翼模型

翼模型はこれまでに実績のある NACA0015 翼をアルミニウム、翼弦長を 500mm とした。また、温度計測を可能とするため、前縁部を肉厚 5mm で中空である。電気ヒータの具備は翼内部とし、ヒータには測温抵抗体を内蔵させ、また、温度調節器により試験条件に合わせた温度の実現を可能とできるようにした。本研究の主眼をなす塗料塗布において、親水性/撥水性面の塗分けは、米国 FAA FAR-25 Appendix-C で規定される着氷条件に合致させた塗布方式と、Off-design を想定した方式で行った。なお、参照供試体としてポリウレタン（従来の航空機に使用）全面塗装の模型とした（図 1 参照）。

4.2 着氷風洞試験と結果

環境温度 -15°C 、風速 90m/s 相当で、米国 FAA FAR-25 Appendix-C で規定される着氷条件（雲水量 $0.337\text{g}/\text{m}^3$ 、平均有効水滴直径 $19.7\mu\text{m}$ を基本、Appendix-C の Envelop 内から適宜選択してパラメトリック研究とした）で実施した。試験の評価方法は、参照模型表面を無着氷状態に保つに必要な電力量と、本研究にて提案した方式（前縁部を親水性面とし、後縁側の一部を超撥水性面で構成した翼表面方式）での必要電力量との比較（防氷に必要な電力量削減からみた省エネ効果）である。代表的な結果を表 1、および 2 に示す。結果より、本研究にて提案した方式を採用した場合、いずれの場合においても従来の全親水性面翼と比して高い省エネ効果を発揮した。

4.3 熱力学的特性の把握

図 2 に示すように、翼模型表面にヒータ（チタン膜製）を装着し、翼内面上かつ翼幅方向中心、翼弦方向に 6 個の熱電対を貼付し、寒冷環境下において翼面上の温度分布を計測できるよう模型を製作した。試験では、環境温度、翼表面温度を計測し、得られた温度分布から翼面上の複数の位置における熱伝達係数を求めた。IR カメラによる非接触での温度計測は、別途、模型表面を黒体塗装して実施した。図 3 に得られた熱伝達係数（Nu 数にて表示）を、経験則によるデータ（平板上の乱流・層流

強制熱伝達の場合) に併せて示す。本試験結果は層流強制対流の場合と極めて良く合致しており、試験法自体の検証、および、今後の熱解析に必要なデータを正しく得られたものと結論する。

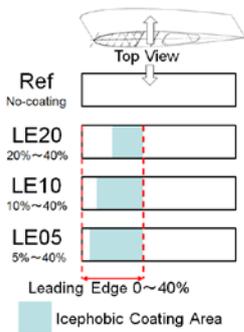


図 1. 防氷塗料の塗布範囲

表 1. 塗料塗布範囲と防氷必要電力量

| Model | Temp. Setting [deg] | Energy consumption [Wh] for 10 min. | Ratio to Ref. in % |
|---------|---------------------|-------------------------------------|--------------------|
| Ref(PU) | 70 | 102.6 | 100 |
| LE20 | 40 | 59.5 | 58.0 |
| LE10 | 25 | 50.7 | 49.4 |
| LE05 | 20 | 37.1 | 36.2 |

表 2. 着氷環境と必要電力量

| Model | Temp. Setting [deg] | Ratio to Ref. in % |
|---------|---------------------|--------------------|
| Ref(PU) | — | 100 |
| 条件0 | 30 | 44.1 |
| 条件1 | 20 | 36.2 |
| 条件2 | 50 | 62.9 |

条件0 LWC 0.314 (g/m²) MVD 18.1 (μm)
 条件1 LWC 0.337 (g/m²) MVD 19.7 (μm)
 条件2 LWC 0.593 (g/m²) MVD 15.0 (μm)

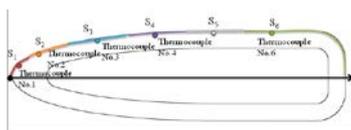


図 2. 温度計測用翼模型

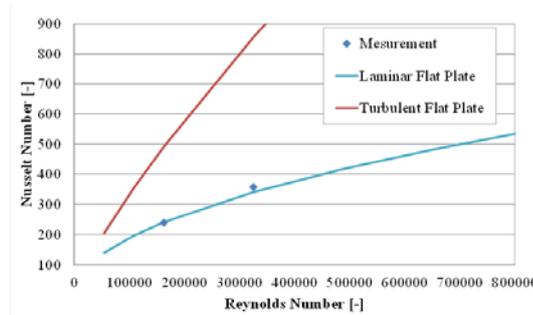


図 3. 風洞試験結果と経験則との比較

5. 今後の計画

本研究の成果をもとに、大型翼模型による試験を実施するとともに、超撥水性塗料（物理化学的手法）と電気ヒータ（加熱法）とを組合わせた防雪氷手法を翼以外の着氷防止策を必要とする機器への適用を図る。

6. 研究成果の発表

- Hiroshi Isokawa , Takeshi Miyazaki , Shigeo Kimura , Hirotaka Sakaue , Katsuaki Morita: Temperature Distribution Measurement of The Wing Surface under Icing Conditions, 69th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, Volume 61, Number 20, November 20-22, 2016
- 浅海 典男, 水野 昌幸, 富岡 義弘, 鈴木 一裕, 日向寺 竜磨, 木村 茂雄: 防氷のために要求される熱量を推定する簡易モデルの実験的研究、第 44 回日本ガスタービン学会定期講演会（酒田）講演論文集, 2016.10 6-pages