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 14 号

2020 年度

工学教育研究推進機構

目次

・はじめに

・先進太陽エネルギー利用研究所における日射量予測
機械工学科　川島豪

・上部集熱式熱サイホンにおける作動流体の流動安定化に関する屋外制御実験
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

・RTK-GPS と加速度センサ情報による路面状態共有
情報工学科　田中博

・再生可能エネルギーの地産地消に有効な自立システムの開発
－PV システムの需要対応型 MPPT 制御および AI によるパネルの不具合診断法の開発－
電気電子情報工学科　板子一隆
電気電子情報工学科　工藤嗣友

・太陽光発電システムの発電効率向上のためのアクティブ PV アレイの開発
電気電子情報工学科　板子一隆
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

・低損失型自己バイアスチャネル型 SiC-MOS ダイオードに関する研究
電気電子情報工学科　工藤嗣友

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ます。

本研究所の使命は、エネルギー創出、蓄積・利用、マネージメントの 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の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す。

2021 年 4 月 22 日に米国が主催する気候サミットで、菅義偉首相は日本の 2030 年度の温室効果ガス削減目標を「2013 年度から 46%削減し、さらに 50%の高みに向け挑戦を続けていく」と宣言しました。しかし、その達成は容易ではありません。本研究所においても、新型コロナウイルスの流行による自宅待機やテレワークで実験、特に屋外の実験が滞るなか温室効果ガス削減に貢献すべく、鋭意研究を続けてまいりました。その成果の一部を本書で紹介いたします。

テレワーク拡大の傾向は、低密度で広範囲に分布している再生可能エネルギーの利用に適した社会への変換を示唆しています。加えて、飲食店の営業自粛、契約社員の失業などの社会問題から食糧援助がクローズアップされ、フードロスなどの SDGs が身近な話題となりつつあります。このような社会情勢のなか、太陽エネルギーに関してもまだまだ研究開発していかなければならないテーマは多く残されていますが、持続可能な社会を実現するには幅広い分野との連携が必要となってきます。そこで、先進太陽エネルギー利用研究所は、2021 年度より、環境化学研究所と統合し、環境科学研究所の 1 つの研究室として、太陽エネルギーのみならず、水力、風力、海洋エネルギー、地熱など幅広い再生可能エネルギーを研究対象とすると共に、様々な分野の研究者と協力して SDG s の達成、ならびに持続可能な循環型社会の実現に向け、先進的な研究をしてまいります。

以　上

先進太陽エネルギー利用研究所における日射量予測

研究者名：機械工学科　　川島　豪

１．研究の目的

電気は需要があって、はじめて発電できるものである。したがって、再生可能エネルギー利用の主流である太陽光発電では、電力の需要が少ない時に、たとえ日射量の多い天気の良い日でも電力会社の要請で発電できないことがある。そこで本研究では、電力の需要と供給をバランスさせるためには需要と供給の予測が必要と考え、太陽光による発電量を予測するための基となる日射量予測システムを人工知能の 1 つである Deep Learning を用いて構築する。特に、先進太陽エネルギー利用研究所が置かれている建物の屋上に設置されている太陽光パネル（図１）の横で、気象観測センサ（図２）により計測している日射量、気温、風速の 11 年分のビッグデータを用いて学習させ、太陽光パネルの設置場所における日射量を予測できるようにする。

２．研究の必要性及び従来の研究

再生可能エネルギーの担い手である太陽発電は徐々に普及してきているが、送電網における電力需要が少ないと日射量の多い天気の良い日でも電気を売る売電、すなわち逆潮流を停止させなければならないことがある。この問題を解消するために蓄電池が導入され始めているが、蓄電と放電の変換効率が 100%でないため電力が失われてしまう。したがって、再生可能エネルギー、特に太陽エネルギーを有効利用するためには、シフト可能な需要を供給に合わせて調整し、電力の需要と供給をバランスさせる必要がある。そのためには、発電量と需要を予測するシステムが不可欠である。本研究で開発する日射量を予測するシステムは、供給側となる発電量を予測するための基となるデータを提供する。

日射量や太陽光の発電量を予測するシステムは多数開発されてきている。しかし、天気の変化が激しい日本では、場所ごとに日射量の変化は異なる。本研究では、先進太陽エネルギー利用研究所が置かれている建物の屋上に設置されている太陽光パネルにおける発電量の予測を目指し、太陽光パネルの横で 11 年以上計測している日射量、気温、風速のビッグデータを用いて、先進太陽エネルギー利用研究所という、特定の場所における日射量を予測するシステムを構築する。先進太陽エネルギー利用研究所の場所における日射量を予測するシステムを構築することが本研究の特色である。

図１　研究所が置かれている建物の屋上に設置されている太陽光パネル

図２ 太陽光パネル横の気象データ観測用センサ類

３．期待される効果

開発された予測システムにより、先進太陽エネルギー利用研究が置かれている建物の屋上に設置されている太陽光パネルの発電量を予測できるようになり、太陽熱、風力などの再生可能エネルギーの予測システムと連動させることにより、本学における再生可能エネルギーの供給量を予測できるようになる。併せて、本学の電力需要は見える化されており、需要パターンは授業日、休校日でほぼ同じであることが確認できる。この２つのシステムを連携させることで、効率的な学内におけるピーク電力の調整ができるようになる。

４．研究の経過及び結果・評価

本研究の日射量予測システムは、MATLAB（Mathworks 社）の AI システムの１つであ

る長短期記憶ネットワーク(Long short-term memory network, LSTM network)をベースとして、元旦からの日数、0時からの時間、日射量、気温、風力を入力とし、1時間後の日数、時間、日射量、気温、風力を予測するものである。

11 年間分のデータを学習させ、その後の6カ月間に渡り日射量と気温と風力の予測値を用いて1時間後の値を予測していった結果を図3に、日射量と気温と風力に関して予測値でなく実際の観測値を用いて1時間後の値を予測していった結果を図4に示す。青色の実線が学習データ、茶色の実線が予測値である。

図3と4を比較すると、予測値を用いて予測した値は、季節変動は現れているものの、平均化された値となっている。一方、観測値を用いて予測した値は、その時々の環境変化が反映されている。図4の日射量の予測値を拡大して図5に示す。青色の実線が日射量の観測値、茶色の実線が日射量、気温、風速の観測値を用いて予測した1時間後の日射量値を示している。精度よく予測されていることが確認できる。

長期予測の特性と短期予測の特性、および長短期記憶ネットワークの構成ならびにパラメータの選定に関する知見を蓄積していき、任意の時間における日射量を精度よく予測できるようにしていくことが今後の課題である。

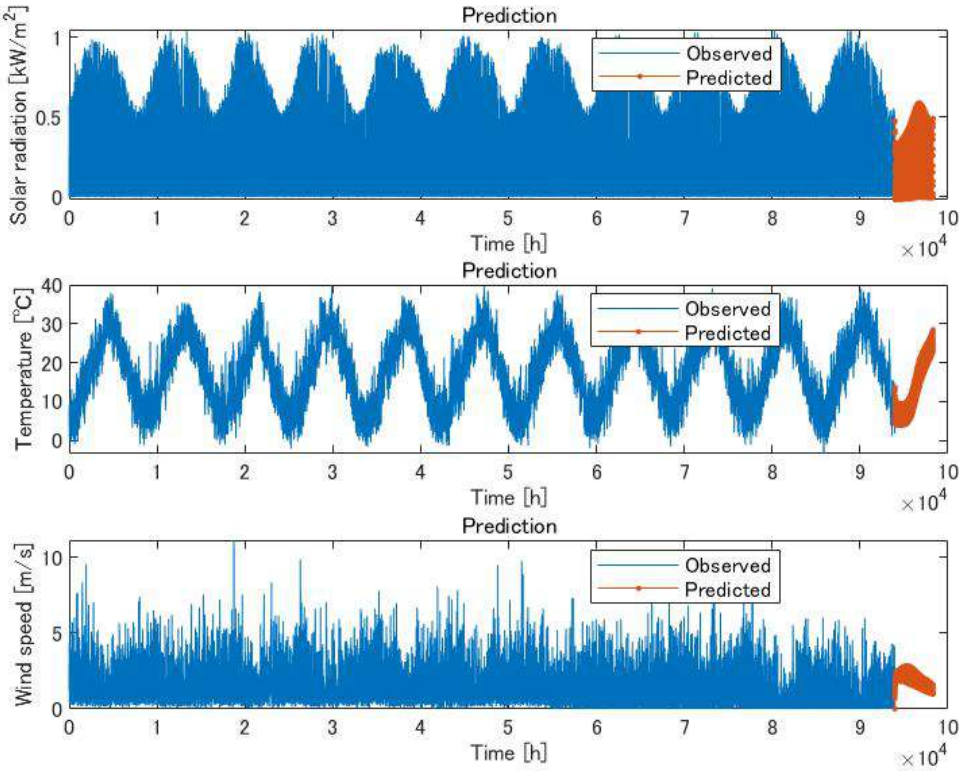


図3　日射量(上段)・気温(中段)・風速(下段)の 11 年間分の学習データ(青色)とその後の6カ月間の予測値を用いて予測した値(茶色)

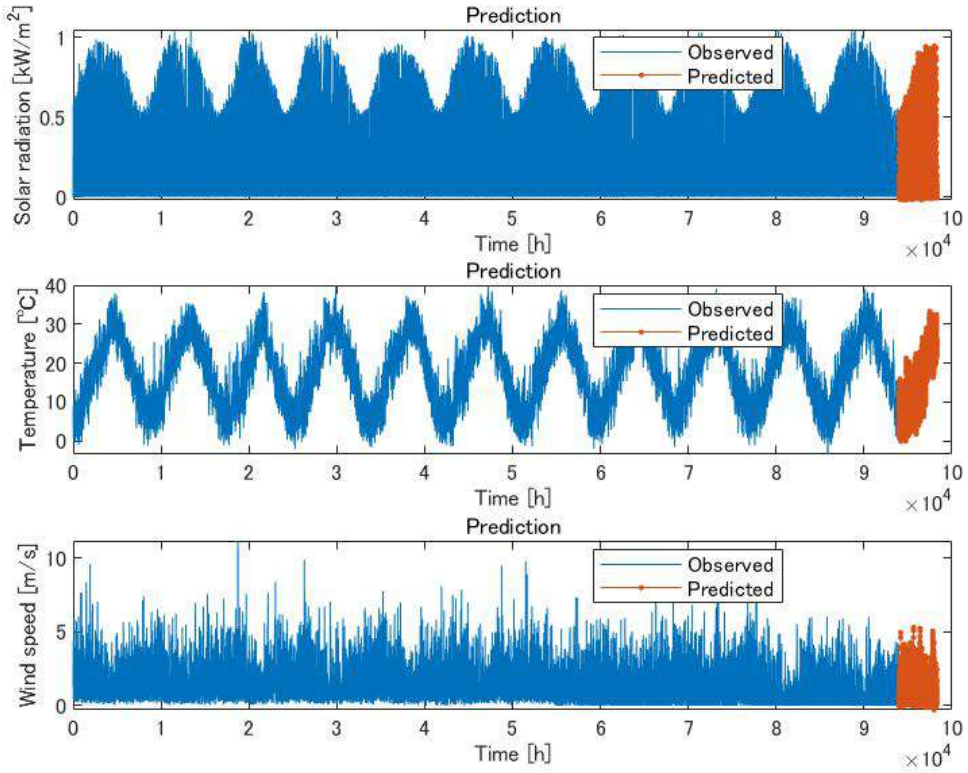


図４　日射量（上段）・気温（中段）・風速（下段）の 11 年間分の学習データ（青色）とその後の６カ月間の観測地を用いて予測した値（茶色）

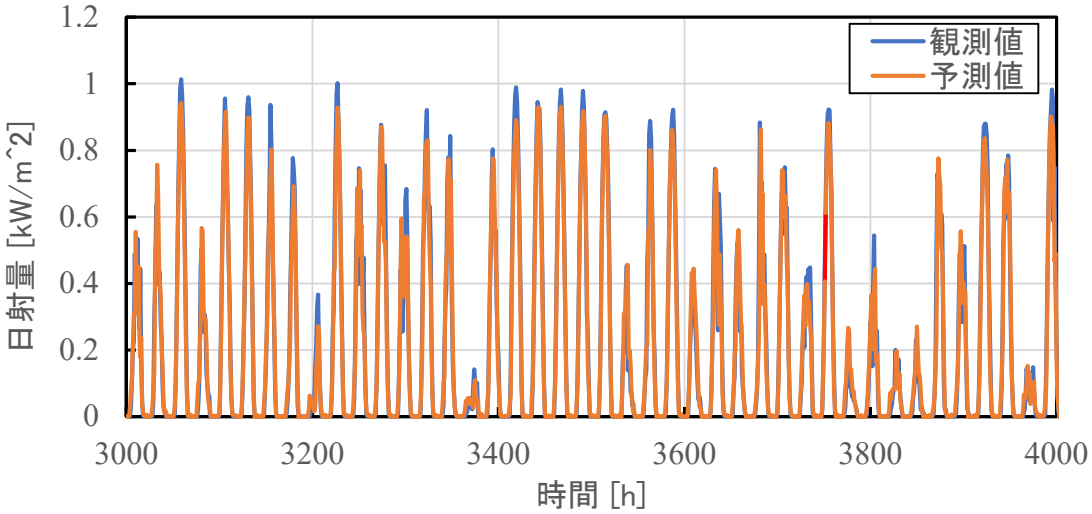


図５　日射量の観測値（青色）と観測値を用いて予測した値（茶色）

５．今後の計画

太陽熱、風力などの再生可能エネルギーの予測システムと連動させることにより、本学における再生可能エネルギーの供給量を予測し、本学の電力需要と連携させ、学内における再生可能エネルギーの効率的な利用に関する基礎データを提供する。

６．研究成果の発表

なし

上部集熱式熱サイホンにおける作動流体の流動安定化に関する屋外制御実験

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（以下タイトルは、11 ポイント、MS ゴシック）

日本における再生可能エネルギーの利用は、太陽光発電、風力発電および水力発電が主である。しかし、太陽光発電の変換効率は 20%程度であり、風力発電の変換効率は 20～40%であるが、ブレード（翼）から発生する低周波音による騒音問題により大型風力発電所の街中への設置は難しい。また、水力発電は日本において有望な再生可能エネルギーの利用方法であるが、発電量の調整が簡便なこと、自然環境への配慮などにより電力の需給調整用に用いられているのみである。そこで本研究では、再生可能エネルギーの 1 つである太陽熱を有効できる上部集熱式熱サイホン（トップヒート式サーモサイホン）に注目し、機器の劣化や故障の原因となる、日射量が少ないときに発生する循環水の間欠的流動を安定化させ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

日本において現在のエネルギーの主体は使い勝手のよい電気とガスであり、再生可能エネルギーも最も使いやすい電力に変換できる太陽光発電が主流である。しかし、温水など低温度の熱として利用されるエネルギーも少なくない。この温水を、変換効率１５～２０％の太陽光パネルで発電した電力でつくるより、変換効率が４０～５０％の太陽熱集熱器でつくるほうが太陽エネルギーを有効利用できる。したがって、外部動力を使わずに比重の軽い温水を上部から下部に移動させられる熱サイホン、特に、屋根の上に設置した太陽熱集熱器から地上に温水を移動できる上部集熱式熱サイホンの問題点を解決することは、太陽熱を有効利用する上で重要な課題である。

熱サイホンには、毛細管式、浸透圧式、蒸気圧式、泡ポンプ式などがある。毛細管式、浸透圧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。蒸気圧式は弁などの構造が複雑となる。そこで本研究では、沸騰による泡で循環水を駆動する泡ポンプ式を対象とする。

泡ポンプ式熱サイホンは、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)]、吉田が引き継ぎ、プレハブのモデルハウスに設置された熱サイホンにより高低差４ｍ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ている[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、朝や夕方の日射量が少ない条件において、熱の移動、すなわち循環水の流動が間欠的となる。この間欠的な流動は太陽熱集熱器での突沸などを生じ、機器の故障や寿命を短くする原因となる。そこで、安定した熱移動（作動流体の流速がほぼ一定）を実現する制御システムを提案し、蒸気泡ポンプ方式の熱サイホン実験装置を用いた屋内実験により循環水の間欠的な流動を安定化させられることを確認してきた[7]。

[1] G. L. Morrison, “Solar Water Heating”, Solar Energy edited by J. Gordon (ISES), pp.223-289,2001

[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ォンの実験的研究”,日本冷凍協会論文集,Vol.10, No.2, pp.247-256, 1993.

[3] S. Ippohshi, S. Tabara, K. Motomatu, A. Mutoh and H. Imura, “DEVELOPMENT OF A TOPHEAT-MODEL LOOPTHERMOSYPHON”, Proceedings of The 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference (JSME), TED-AJ03-578, pp.1-8, 2003.

[4] S. Ito, K. Tateishi and N. Miura, “STUDY OF A THERMOSYPHON SYSTEM WITH A HEAT SOURCE NEARTHETOP AND HEAT SINK THE BOTTM”, Proceedings of ISES Solar World Congress 2007 (Beijing, China), pp.1-5, 2007.

[5] H. Yoshida, H. Imada, N. Hagino and N. Yada, “Hydropower Generation by Solar Thermosyphon”, Proceedings of International Conference on Solar Energy and Buildings (EuroSun2014, ISES), pp.1-6, 2014.

[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, pp.1-14, 2016.

３．期待される効果

本研究により外部電力を必要とせずに日射量変化に応じて上部から下部への安定した熱移動を実現する上部集熱式熱サイホンの制御システムを開発することで、安定した太陽熱の有効利用を実現できる。加えて、熱サイホンの制御用電源を小型ソーラーパネルなどのエナジーハーベスティングにより供給することで、開発されたシステムは環境への負荷がない自立型システムとなる。また、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、BCM（Business ContinuousManagement）にも有用なシステムとなり得る。

４．研究の経過及び結果・評価

4-1 熱サイホン実験模型

上部集熱式熱サイホンは、太陽熱集熱器で熱せられた低圧の循環水が沸騰し、その気泡の浮力で温水を下部に移動させるシステムで、外部動力を使用しないことが特徴で

ある。図１に泡ポンプ式熱サイホンの屋外実験模型の写真を示す。循環水は１本の閉管路を循環する。太陽熱集熱器で沸騰させられ、２相流となった管内水は、その気泡の浮力で駆動力を得た後、凝縮器で液体に戻されて下部の熱交換器に送られ、熱エネルギーを放出し、復熱器で予熱されて太陽熱集熱器に戻る。太陽熱集熱器で得られた熱エネルギーが熱交換器で放出される共に、潜熱と顕熱の一部が凝縮器から一体の復熱器に伝わり循環水を予熱して沸騰を助け、凝縮器に戻る熱循環のループが共存する構造である。平衡状態では、太陽熱集熱器で得られた熱エネルギーは全て熱交換器で放出される。

実験装置では、凝縮器で太陽集熱器からの２層流の蒸気が冷やされて消える様子を観察できるよう凝縮・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、凝縮器から熱交換器入口、熱交換器出口から復熱器までの流路は半透明な PFA チューブで配管されている。太陽熱集熱器と凝縮器には、沸騰により生じた気泡が上に流れるよう若干の上り勾配が付けられている。各部温度は熱電対で、液溜め内圧力は圧力センサーで、循環水の流量はコリオリ式流量計で、日射強度は全天日射計で測定され、データレコーダで収集されるよう配線されている。

図１　上部集熱式サーモサイホン屋外実験装置

本研究で提案している上部集熱式熱サイホンにおける循環水の流動安定化システムは、管内圧力を下げることで沸点を低下させて循環水の間欠的な流動を安定化させるものである。制御システムは、ワンボードマイコン(Arduino Uno)にリレーシールドボード(DFROBOT 製 DFR0144)が搭載され、循環水の流量と液溜め内圧力のデータが AD コンバータを介して入力されるよう構成されており、流量が 9 分以内に 40 ml/min を超え、10 ml/min 未満になり、再度 40 ml/min を超えて 10 ml/min 未満になると間欠的な流動が発生しているものとみなして液溜め内圧力を-75 kPa まで 30 秒ごとに 1 秒だけリ

レーを操作して弁をあけ、循環水が突沸しないようにゆっくりと減圧するようプログラムされている。

４－２　屋外実験の結果と考察

朝のまだ日射量が少ないときに発生した循環水の間欠的な流動を制御により連続的な流動にした実験例を図２に示す。太陽熱集熱器の出口温度を紺色の実線、沸点の理論値を青色の細線、気温を灰色の実線、管内流量を茶色の実線、液溜め内の負圧を橙色の実線、日射量を赤色の実線で示している。

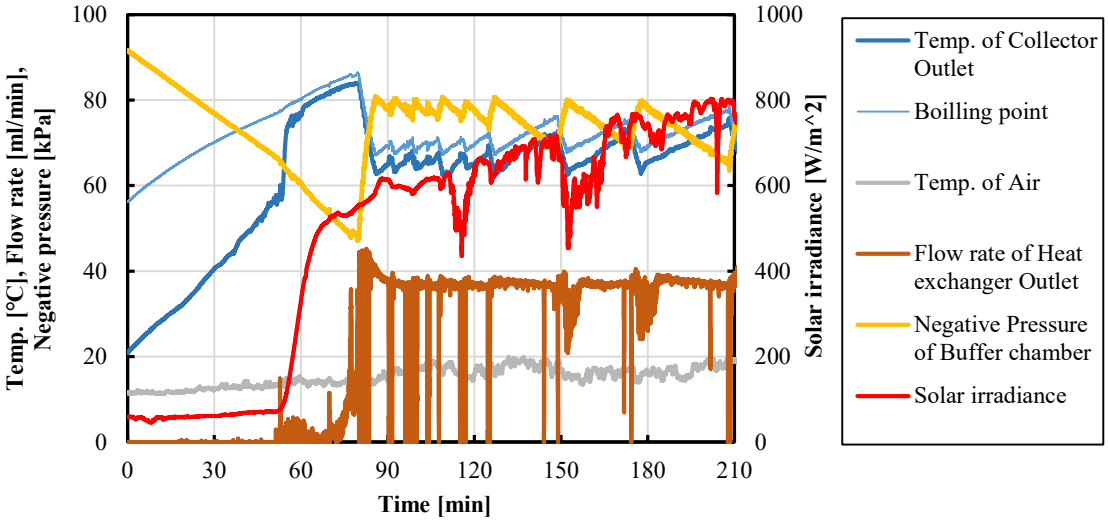


図２　屋外制御実験結果

太陽熱集熱器に入る日射量を計測するため日射計を集熱管の間に設置している。集熱管は南向きに設置しているため、朝の東からの日射は集熱管の陰になり少なく計測されている。その後、60 分あたり集熱管全体に陽があたり始めるため日射量が急激に増加し、集熱器ヘッダーの循環水が沸点の理論値まで温められ、沸騰を始め、80 分あたりで間欠的な流動が始まる。この間欠的流動は、沸騰により集熱器ヘッダーで温められた循環水が流出し冷たい循環水が流入するが、日射量が少なく流れている状態で沸騰するまで温められないため沸騰が止まり流動がなくなる。再度温められて沸騰すると流動が始まることを繰り返すことで生じる。したがって、日射量が多ければ、連続的な流動となる。この間欠的な流動を制御システムが捉え、管内圧力（液溜め内圧力）を突沸しないようゆっくりと下げることで沸点が下がり、連続的な流動にしている。しかし、90 分を過ぎると再び間欠的な流動が始まる。これは、配管にわずかな漏れがあるため管内圧力があがり、沸点が上がることで生じる。しかし、制御システムが働いて管内圧力を下げることで連続的な流動に変えている。また、115 分のところでは管内圧力が上がるとともに日射量が下がるために間欠的な流動になるが、このような場合でも

制御システムが働き、管内圧力を下げることで連続的な流動に変えている。以上の結果より、開発された上部集熱式熱サイホン用制御システムの有効性を実験により確認することができた。

５．今後の計画

１．太陽光発電による電力供給、すなわち、エネジーハーベスティングによる制御を実現し、自立した熱サイホン制御システムを構築する。

２．朝の日射量が少ないときに発生する循環水の間欠的な流動を素早く安定化させるため、エネジーハーベスティングにより得られた電力で予熱できるよう実験装置を改良し、その有効性を確認する。

３．熱電素子による凝縮器と復熱器における熱移動を利用した発電により，太陽熱による自立した熱サイホン制御システムを構築する。

６．研究成果の発表

[1] 川口，藤澤，川島，上部集熱式サーモサイホンにおける作動流体の流動安定化に関する屋外実験，第 29 回環境工学総合シンポジウム 2020，No.405.

RTK-GPS と加速度センサ情報による路面状態共有

研究者名：情報工学科　田中　博

１．研究の目的

SDGs の取り組みの一環として、再生可能エネルギーの有効利用の重要性は論を俟たない。本学でも建築物の屋上や壁面のスペースの有効利用の一環として、太陽電波パネルを設置して電力の有効活用に取り組んでいる。

本学は駅からの距離もあり、バス通学以外の自転車通学の学生が多い。しかも、駅からは基本的に緩やかな登坂の道路であり、身体的負担は大きい。電動アシスト自転車を導入することができれば、学内の発電電力の有効利用に、かつ、自転車通学者の負担軽減に寄与できると考えられる。

一方、近年 RTK-GPS と呼ばれる GPS 衛星からの信号を受信する基準局からの補正信号を受信することにより、GPS より極めて高精度な測位結果が得られる方式の利用が進められている。自転車にこの RTK-GPS の受信機と路面状態を検出するセンサを取り付けることにより、通学途中の道路の状態を自動的に取得し、その情報を共有する仕組みを実現することにより、自転車利用以外の人にとっても有益な情報になると考えられる。取り組みのねらいを図 1 に示す。

図１　電動アシストバイクによる再生可能エネルギープラットフォーム

２．研究の必要性および従来の研究

道路などの社会インフラの維持管理は、これからの高齢化社会において喫緊の課題であるものの、道路の状態を定期的にモニタすることの負荷も大きい。このため、自動車に路面状態をモニタするためのセンサ（カメラ、加速度センサ搭）を搭載するとともに、GPS 信号から位置情報を受けて、路面状態を車両走行によって自動的に取得するする方法が一部で利用されつつある。

上記の方法は自動車の利用を前提にしており、幹線道路の状態を自動測定するものである。一方で、生活道路、路地裏の道路などの比較的細い道路や歩道などに関しては、上記の方法では困難である。したがって、細い道路での位置を特定できる測位精度と大規模なセンサを搭載せずとも道路状態を推定できる方法が必要である。

３．期待される効果

RTK-GPS の利用により、路地内での位置の特定が可能となる。一方、後述するが、加速度センサによる路面からの振動情報と体感評価との相関を明らかにすることにより、振動情報から路面状態を間接的に推定、評価することが可能である。学生が通学やその他買い物などで使用する電動アシストバイクを利用すると自動的に路面状態を取得することができる。その情報をクラウドに格納、地図情報とリンクさせることにより、路面状態を近隣に生活している住民が共有する仕組みが構築できる。自転車の利用者だけではなく、一般の歩行者、特に歩行に障碍がある方、乳母車や車いすの利用者などにとって有益な情報を提供できると考えられる。

４．研究の経過及び結果・評価

(1)RTK-GPS による測位精度の確認

スマートフォンに内蔵されている GPS 受信機による測位結果と RTK-GPS による測位結果の比較の一例を図 2 に示す。場所は、相模川沿いの河川敷のサイクリングロードである。本学に設置した測位結果を補正する信号を送信する基準局から 8km 以上離れた場所での結果であるが、十分な測位精度が確保できることを確認した。一方で、スマートフォンによる測位結果は一部路面から外れた結果となった。

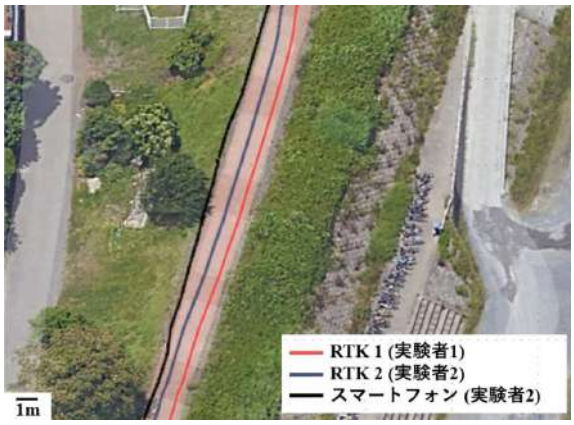


図 2　RTK-GPS による測位結果（移動軌跡）

(2) 振動加速度と体感評価

自動車にカメラ、加速度センサとともに路面の凹凸（センサと路面間の距離）を測定するセンサを搭載して路面状態を取得する方法があるが、自転車にカメラや凹凸を測定するセンサを取り付けることは現実的ではない。したがって、自転車に設定した加速度が検出する走行時の振動加速度と、

そのときの自転車利用者の体感評価のデータを同期して取得する実験システムを構築し、両者の相関を調べた。その結果を図 3 に示す。この結果から両者に相関があることを確認し、加速度の情報から間接的に路面の状態を推定できる見通しを得た。

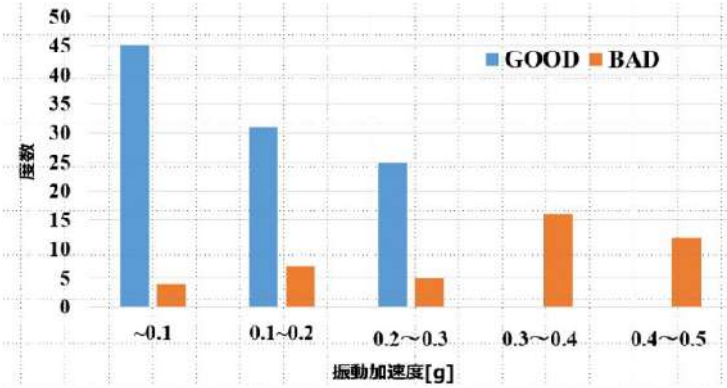


図３　振動加速度（標準偏差）と体感度数

(3) システム構成

上記開発技術とインターネットで提供されている地図情報サービスを連携することにより、地図上に路面状態を表示することが可能になる。その基本構成を図 4 に示す。RTK-GPS の基準局は、実験時と同様に本学に R 科吉留准教授が設置した基準局を使用する。電動アシスト自転車に RTK-GPS 受信機、加速度センサとこれらからのデータを受信するラズベリーパイを設定する。これらをバッテリ駆動させることにより、位置情報と加速度情報を取得する。

上記(2)で述べた加速度データからの体感評価による路面状態推定は、被験者数が少なく推定の基準を現段階で確定することは難しいが、加速度データからの路面推定は可能と考えられる。今後の実験により基準値を決定することにより、加速度データから間接的に路面状態を推定し、その結果を地図上に表示する。この構成によって、路面情報として Web を介して共有することができる。

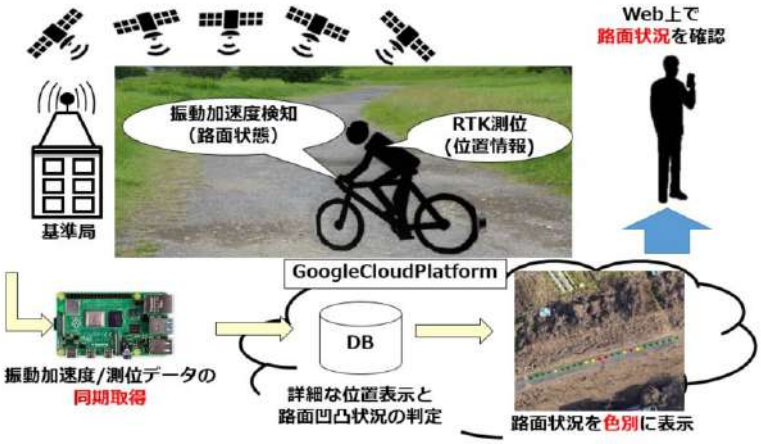


図 4 路面情報共有システムの基本構成

５．今後の計画

自転車にRTK-GPS受信機と加速度センサを取り付けて路面状態を推定する方法を検討、実験データの取得と解析、評価によって推定できる見通しを得た。コロナ禍の影響もあり実験実施に大きな制約があり、体感評価の被験者は２名にすぎないため、被験者の数を増やしてより推定の信頼度を高めることが必要である。また、インターネットサービスとして提供されている地図情報とリンクさせるシステムの構築が必要である。当面のリソースを考慮して、本研究の継続の可否を判断したいと考えている。

６．研究成果の発表

(1) 小川 真輝, 吉留 忠史, 五百蔵 重典, 田中 博, “RTK 測位における基準局からの距離の測位精度への影響評価”, 2020年度測位航法学会全国大会, 1 page.

(2) 小川 真輝, 吉留 忠史, 田中 博, “路面プロファイル情報共有のための測位と加速度情報取得に関する一検討”, GPS/GNSSシンポジウム2020, 1 page.

(3) Masaki Ogawa, Yuusuke Kawakita, Tadashi Yoshidome, Hiroshi Tanaka, “Investigation of road surface condition sharing system based on human sensation using RTK-GPS and acceleration sensor”, International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing, 2PM2-1-4, pp.317-320.

再生可能エネルギーの地産地消に有効な自立システムの開発
－PV システムの需要対応型 MPPT 制御および AI によるパネルの不具合診断法の開発－

研究分担者　電気電子情報工学科　板子一隆
研究分担者　電気電子情報工学科　工藤嗣友

１．研究の目的

本研究課題では、太陽光発電技術、太陽熱移動システム、水素貯蔵と燃焼、エネルギーマネージメントに関する機械系、電気系、情報系の技術を発展させ、AI を活用して統合し、平時から利用でき、平時に使用することで災害時にも使いこなせ、供給と需要が時と場所で変化する環境において再生可能エネルギーの地産地消を実現する本学独自のエネルギー自立システムを開発する。

研究分担者等はこのエネルギー自立システムの太陽光発電システム部の最大電力点追従(MPPT)制御を需要に対応させることで、AI によるエネルギー自立システムの最適制御の要素をエネルギー発生源側に集約させると同時に、エネルギー貯蔵装置の負担を減らし長寿命化を実現するための制御方式を新たに開発する。

さらに、太陽電池パネルの不具合をセルやストリングレベルでの検知をより短時間で高精度化するためにディープラーニング(AI)を用いた新しい方法を開発し、システムの信頼性向上を実現する。

２．研究の必要性及び従来の研究

AI によるエネルギー自立システムは様々な変動要素があるため、システムを簡単化することが必要になる。今回の需要対応型 MPPT 制御では、負荷変動に対応してエネルギーを供給するため、エネルギー制御の観点から系を簡単化することが可能になると考えられる。さらに、エネルギーバッファの長寿命化にも貢献する。開発する MPPT 制御は先に提案した”スキャン法”に基づくものであり，国内外において検討されていない。

さらに、パネルの不具合を検査する方法には、ドローンを用いたサーモ画像から温度分布による画像判定や、暗状態における電流・電圧特性において逆方向リーク電流の値によって判定する方法が一般的である。これらの方法は、時間が掛かる問題がある。より短時間で判定精度を上げるためには、ディープラーニングを活用する方法が有効である。ディープラーニングには、大量の画像や電流・電圧特性をラベル付けさせたデータが必要である。この方法を利用することで、短時間で高いレベルでの認識を実現することができることから、太陽

電池セルの異常や故障検出を早期に発見できると考えられる。特に、太陽電池セルの暗状態における電流・電圧特性のラベル付けには、正確なデータが不可欠なため精度の高い測定装置を使ってデータ収集が必要となる。従って、まずディープラーニング用の基礎データを大量に集めることを目指し，不具合検出システムの構築を試みる。この検討は国内外において行われておらず、初めての試みである。本研究では、ディープラーニングを用いた太陽電池パネルの不具合検出方法について、太陽電池のストリングレベルとセルレベルでの検討を試みる。

３．期待される効果

本学独自の AI によるエネルギー自立システムの開発を加速化させるとともに、システムの長寿命化を実現することが期待できる。また、この手法が実現されるとパネルに不具合が生じると直ちにその対応が可能となり、火災などの深刻な被害を回避でき、システムのさらなる信頼性の向上が期待できる。

４．研究の経過及び結果・評価

(1) 需要対応型 MPPT 制御

MPPT 制御に関しては，前年度にスキャン法を応用して DC-DC コンバータを用いて適切な動作点の検出を可能とした。そこで今年度は，需要データの一例を用いて負荷の変動に対するバッテリーの充放電特性を測定し，充放電の減少が確認され本提案の需要対応型 MPPT 制御法の有効性を明らかにした。これらの得られた成果をシンポジウムにおいて発表した。

(2)AI によるパネルの不具合検出法

本研究で用いた AI は９０ノードの入力層と隠層から構成されている。AI がリアルタイムで検出するための入力量は時間、ストリング電流、ストリング電圧である。ホットスポットがあるかどうかを１か０で出力する AI なので出力層は１つのノードになっている。本研究では Adam という solver を使用し、AI と電流電圧センサのみでホットスポットを検出するシステムを提案している。図１は開発したリアルタイム検出システムである。図２は今回使用した太陽電池パネルである。図３は開発したシステムの出力例である。この図

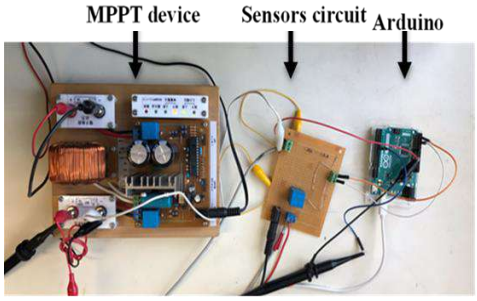


図１ 開発したシステム

図２ 使用した PV パネル

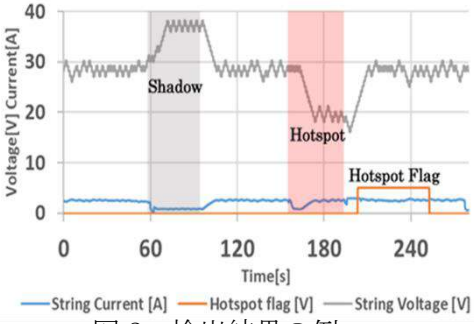


図３　検出結果の例

より、60 秒時点で正常セルに影を付加してもホットスポットフラグの出力はゼロであるが、150 秒時点で欠陥セルに影を付加しホットスポットが発生するとホットスポットフラグの出力が 5V となり異常を検出することができた。

一方，セルレベルでの検討についてはこれまで、サーモグラフィーによる画像、セルの静特性よるセルの良好、不良の判別を行い、それらのデータを AI の学習データとして用いてセルの良好、不良の判定できるようになった。

そこで、今年度は、時系列データを取ることを目的に、図 4 に示すような簡易太陽電池モジュールを製作した。さらに、単セルに素早く影が付くようにシャッター機能を設けた。それぞれの太陽電池の出力電流、電圧を測定するために、図 5 に示すようにマイコンと電流・電圧センサを用いたデータロガーを製作した。このデータロガーは、市販されている同等な測定レベルの機能と比較して約 1/10 の値段で造ることができた。このデータロガーより、電流、電圧、電力の時系列データを取得することが可能になった。

次に、異常診断について以下に示す。下図は、製作したデータロガーから得られた太陽電池セルの電気的特性である。これらの特性は、太陽電池セルに影が有る状態から無い状態へと変化したときの様子で、図 6 が良好セル（ホットスポットの発生していないセルを示す）の結果、図 7 が不良セル（ホットスポットの発生しているセルを示す）の結果を示す。電流特性（青線）を見ると、良好セルでは、ターンオフからターンオンへの変化がなだらかに上昇しており、一方で不良セルでは、やや急峻で電流が上昇している様子がわかる。

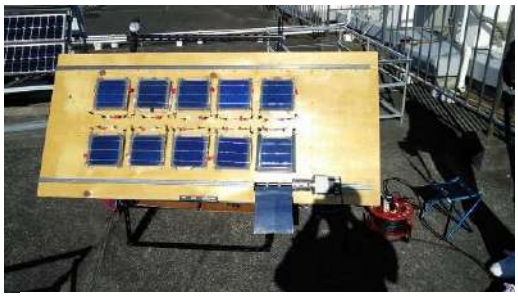


図 4 製作した簡易太陽電池モジュール

図 5　製作した測定用データロガー

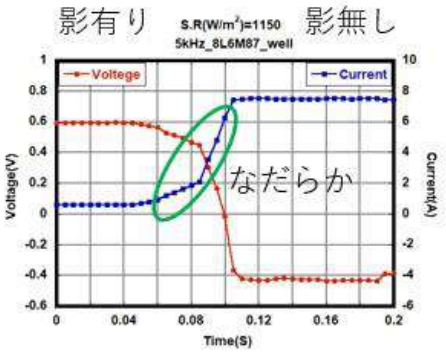


図 6 良好セルのターンオン特性

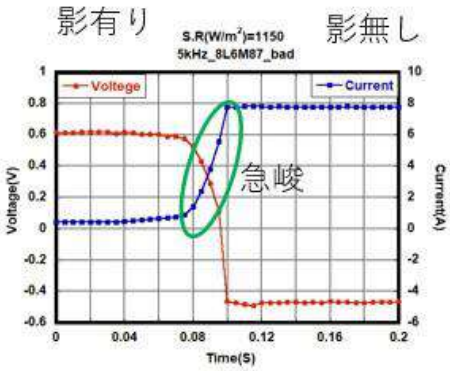


図 7 不良セルのターンオン特性

下図は、太陽電池セルに影が無い状態から有りの状態へと変化したときの様子で、図 8 が良好セルの結果、図 9 が不良セルの結果を示す。電流特性（青線）を見ると、良好セルでは、ターンオンからターンオフへのテール電流が長く、一方で不良セルでは、テール電流が短い様子がわかる。テール電流が長い原因としては、パッシベーション膜と Si 基板との界面における表面再結合が小さく（再結合率が小さい）いので、キャリアの寿命が長くるためと考えられる。一方、テール電流が短いのは、パッシベーション膜と Si 基板の界面における表面再結合率が大きいためキャリアの寿命が短いためと考えられる。

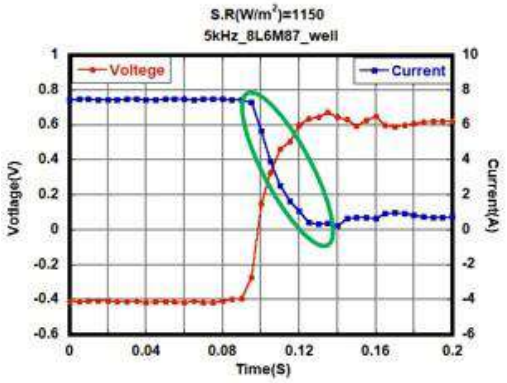


図 8 良好セルのターンオフ特性

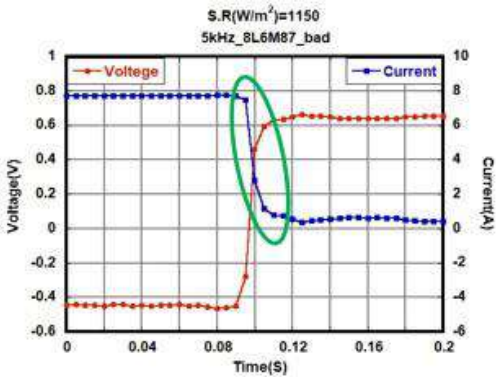


図 9 不良セルのターンオフ特性

５．今後の計画

需要対応型 MPPT 制御については，スキャン法を用いて鉛蓄電池への充電制御について有効性を示したが、今後はリチウムイオン電池への充電について検討を行う。AI によるパネルの不具合検出法については，システムとしての検出方法はほぼ完成した。セルレベルでは，セルの良好・不良における電気的な違いが測定より判明したことから、これらのデータを時系列データとして AI に学習し故障検出の判定ができるよう今後継続して開発を行う。

６．研究成果の発表

【学会誌】

(1) Ali ALHABIB, Kazutaka ITAKO and Tsugutomo KUDOH,”“Development of Real-Time Hotspot Detection System Utilizing Artificial Intelligence in PV Generation System”
Journal of Advanced Science, Vol. 32, pp.32103-1～32103-7(2020)（査読付）

【シンポジウム】

(1)志賀、大貫、久邇、柳生、板子、” PV 発電システムにおける需要対応型 MPPT 制御の効果”, 2020 SAS Symposium,No,B-1

【展示会】

(1) 第 15 回再生可能エネルギー世界展示会(東京ビッグサイト)(展示)2020 年

太陽光発電システムの発電効率向上のためのアクティブ PV アレイの開発

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
共同研究者　ホームエレクトロニクス開発学科　黄　啓新

１．研究の目的

太陽光発電システムのアレイに部分的な影がかかるとアレイへの光が不均一となり出力が大幅に低下し，大きな問題となっている．この出力低下は，影が付加されたパネルと並列に接続されたバイパスダイオードによって主電流が迂回されるため，太陽電池の電圧に対する出力電力の特性(P－V 特性)に複数のピークを発生し，パワーコンディショナ(PCS)に搭載されている従来の最大電力点追従(MPPT ： Maximum Power Point Tracking)制御である P&O(Perturb and Observe)法では必ずしも最大電力点で動作出来ないためである．そこで，研究代表者は先に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(特許第 4294346 号，特許第 5503745 号)，改良を行い実用化に至っている．上記のこれまでのアプローチは太陽電池アレイの特性に沿って最も電力の高いところで使用するというパッシブな利用方法であった．この場合，確かにその条件下でアレイが出力し得る最大の電力を取り出すことが出来る．しかし，このアプローチでは，アレイを構成する並列に接続された各ストリングでの最大電力点が異なるため，アレイの最大電力は本来持っている各パネルの最大電力の総和よりも低くなり(ストリング間のミスマッチ)，アレイのポテンシャルエネルギーを 100%活用出来ていないため，この問題を解決するための新しい制御手法の開発が望まれている．

本研究では，これまでのアプローチとは異なり，太陽電池アレイそのものの特性を理想的な状態に制御する”アクティブ PV アレイ”を新しく提案し，従来システムと比較することにより，その効果を実証することを目的としている．この提案する PV アレイシステムは，原理的にどのような条件でも，例えば部分的な影が生じてもアレイの最大電力が各パネルの最大電力の総和となるように制御されるため，従来の PCS(P&O 法を搭載)をそのまま用いてもアレイの持っているポテンシャルエネルギーを 100%回収できるようになると考えられる．なお，提案システムを構成するユニットは研究代表者が先に開発した”スキャン法”を搭載することで実現できるものであり，PV アレイそのものを制御して常に理想状態を維持する制御手法に関する研究は初めての試みであり国内外において行われていない．

そこで，2019 年度は，小規模での基本的な実験システムを構築し，従来システムとの比

較を行うことにより本提案手法の効果を実証した．2020 年度は，各ユニット間の通信システムを構築し，そのアレイシステムで実験を行い，本提案システムの有効性を実証した．

２．研究の必要性及び従来の研究

太陽光発電システムの発電性能は主に PCS に搭載されている MPPT 制御の性能に依存する．一般的な P&O 法では，Ｐ－Ｖ特性に複数のピークを生じることで，必ずしも最大電力点で動作出来ないという問題があった．これに対して研究代表者は先に”スキャン法”という確実に最大電力点で動作できる方法を開発し，その有効性を実証した．これらの手法は，アレイの特性に従って，最も出力電力の高くなる PMAX 点を選択して動作させるものである．ここで、各パネルの最大電力の総和をポテンシャル電力 P0 と呼ぶこととする．一般に，最大電力 PMAX は P0 よりも大幅に低くなる．すなわち，アレイの光が不均一になるとアレイの最大電力 PMAX 点で動作させたとしてもストリング間のミスマッチにより，ポテンシャル電力 P0 より低くなり，アレイのポテンシャルエネルギーを 100%活用出来ていないのが現状である．

そこで，本研究では、アレイそのものの特性を理想状態となるように制御する”アクティブ PV アレイ”を提案する(特願 2018-30000)．すなわち，このシステムはパネル毎に昇降圧形 DC-DC コンバータで構成されるユニットを接続し，全てのパネルの最大電力をアレイのある電圧点に集約し，そこで常に一つのピーク点でポテンシャル電力 P0 を発生するように制御するものである．この提案システムを用いるとピークが一つになるため，従来の PCS(P&O 法を搭載)をそのまま用いてもアレイの持っているポテンシャルエネルギーを 100%回収でき大幅な出力電力の増加が得られると考えられる．

国内外の研究において，制御技術を用いてアレイそのものの効率改善のためにバイパスダイオードの損失を低減させる研究は見受けられるが，取得電力そのものを増加させることはできない．本研究では，これまでのアプローチとは異なり，あらゆる環境に対して太陽電池アレイそのものの特性を常に理想状態に維持するアクティブな制御手法であり，このような研究は国内外において行われていない．

３．期待される効果

提案システムを構成するユニットは，研究代表者が先に開発した”スキャン法”を搭載することで実現できるものであり，アレイのポテンシャルエネルギーを 100%回収できる究極の制御システムと考えられる．このシステムは，部分影ばかりでなく，光が不均一になるパネルの混成使用，異方位設置などに対しても有効であり，適用範囲が広いため，今後の太陽光発電システムを構築する上での必須技術となり得ると考えられる．

４．研究の経過及び結果・評価

2020 年度はアレイ規模を大きくしたシステムのシミュレーションにより本提案システムの実用性を検証した.

さらに，図 1,2 に示すように，複数のパネル・ユニットでストリングを構成し，これらを並列に接続してアレイを構成する．複数のユニットを製作し，これらのユニットを制御するための制御プログラムを新たに開発した. アレイユニット間の通信は有線で行い, アレイと中継器との間は図 3 に示すようにメガソーラーなどでの利用を想定して 3G 無線通信方式を使用した. 中継器は LAN を通してアレイデータをサーバーに送信し, 図 4 に示すようにモニターでパラメータ調整や各パネルの電力，I-V データなどを監視できる構成とした.

今後，このシステムを用いて長期的なデータを収集，分析する予定である.

.

図 1 PV アレイシステム

図 2 開発した制御ユニット

図 3 3G 通信システム

図 4 監視モニターシステム

５．今後の計画

今後は，パネル毎に制御する技術を発展させ，パネルル毎に不具合を検出するシステムを新たに開発する予定である。さらに，今回開発したアクティブ PV アレイシステムと比較して不具合時の有効性を実証する予定である.

６．研究成果の発表

【国際学会】

(1) K.Itako, X.Chuanxiang,T.Kudoh, K. Koh and Q.Ge,”Development of Active PV Array Using Real-Time Scanning Method”Proceedings of ICFEE 2021(7pages)(査読付)

【シンポジウム】

(1) 徐、板子、”PSIM によるアクティブ PV アレイの効果の検討”,2020 SAS Symposium,No,B-3

【展示会】

(1) 第 15 回再生可能エネルギー世界展示会(東京ビッグサイト)(展示)2020 年

低損失型自己バイアスチャネル型SiC-MOSダイオードに関する研究

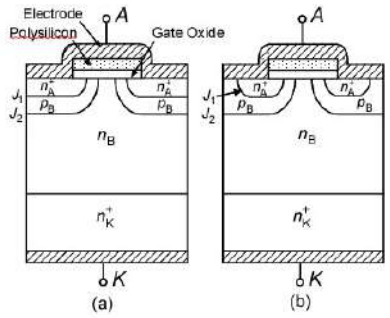
研究者名：　　氏名　工藤　嗣友

１．研究の目的

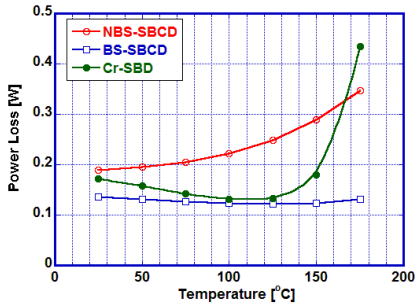
近年、移動端末機器類、特にスマートフォンなどの普及により、これらのバッテリー充電回路等に用いられる半導体素子としてダイオードの低損失化の要求が高まっている。また、LSI の動作電圧の低下に伴い LSI 用の電源電圧を生成する電源回路用に低いオン電圧のダイオードが求められる。低オン電圧のダイオードとして一般的にショットキーバリアダイオード(SBD)が用いられることが多いが、温度が高くなると熱暴走を起こし整流特性を失う問題がある。この問題を解決するデバイスとしてチャネル MOS ダイオードに自己バイアスによる２端子化を導入した構造(Self-Biased Channel MOS Diode: 以降:SBCD)を提案した。これらのデバイス構造は、プロセスコストを抑えレチクル枚数４枚で可能としたノンボディ型 SBCD(NBS-SBCD)と電気的特性を優先としレチクル枚数 5 枚で可能としたボディ短絡型 SBCD(BS-SBCD)である。これまで、提案したデバイスは、Si 材料を用いたデバイスで約 175℃でも熱暴走しにくい実験・シミュレーション結果から得られている。しかし、本構造に関しては、SBD ほどではないものの熱暴走の傾向が見られている。その成果について、昨年度、国際学会にて発表を行った。そこで、本研究は、Si 材料では耐えられない高温用に適した半導体材料として SiC(Silicon Carbide)に注目し、SiC 材料を用いた高温動作、低オン電圧、低損失化を可能とした自己バイアスチャネルダイオードの開発を目的としている。同時に、このデバイスのオン電圧と耐圧のトレードオフの改善も行う。SiC 材料を使ったデバイスは、Si 材料よりも幅広いアプリケーションが期待され、たとえば電源用以外にも、低オン電圧を利用したガス探知用半導体素子などへの応用も可能となる。試作前に、デバイスシミュレータを用いて解析を行い、試作デバイスへの可能性を探る。

２．研究の必要性及び従来の研究

これまで、研究開発してきた耐損失ダイオード構造を図１に示す。両デバイスとも、2 重拡散構造である。これまで、我々は、図２に示すように Si 材料で作成した自己バイアスチャネル MOS ダイオード特性より、高温領域では熱暴走(赤い線、青い線)を起こしていないことを明らかにしている。そこで、さらに高温領域で熱暴走を起こさない素子への要求がたか待っていることから、Si に代わる材料として SiC 材料が注目されている。



(a) 断面構造



(b) 電力損失特性

図 2 自己バイアスチャネルダイオードの断面図と電力損失特性

３．期待される効果

① SiC の材料を使用することで Si よりも以下の項目で期待保てる。

・同程度の耐圧を求める場合、SiC は Si の約 1/10 の厚さで達成でき、かつ膜厚が薄くなるため抵抗値が小さくすることが可能である。

・約 400℃程度の高温時でも動作が可能である。

・低損失スイッチング化への期待。

② PN 接合型 SiC ダイオードと自己バイアスチャネル SiC ダイオードと比較して、約半分程度のオン電圧値を得ることが可能である。

４．**研究の経過及び結果・評価**

提案デバイスは、さらなる低オン電圧化とゲート酸化膜の薄膜化に伴うリーク電流防止を目的に、ゲート電極材料に対し High-k 材料を採用し基本的な電気的挙動について 2D デバイスシミュレータを用いて解析した。図 3 は、ゲート酸化膜を 20～80 Å と変化した場合の SiO_2、Al_2O_3 をそれぞれ採用したときのオン電圧値の結果である。同じ膜厚に対して、$A_{l2}O_3$ 材料を採用した場合、SiO_2 材料と比較してオン電圧の低減化を可能としていることを確認した。

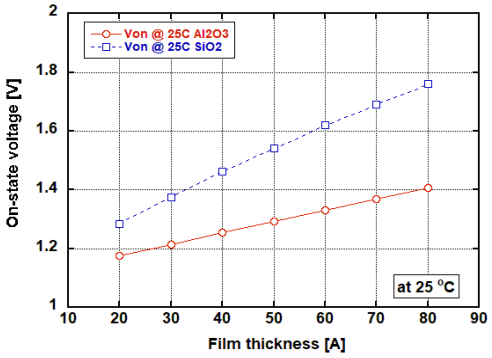
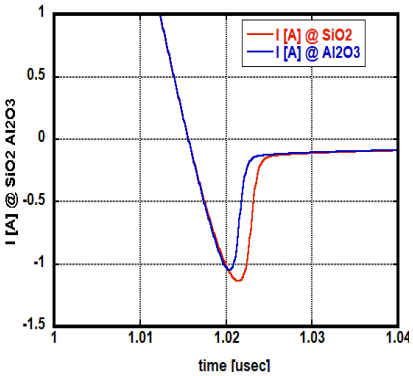


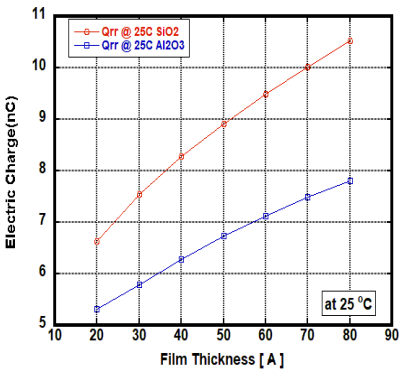
図 3 SiO_2 と Al_2O_3 のオン特性

図 4(a)、(b)は、それぞれゲート酸化膜厚 20Å時の SiO_2 材料と Al_2O_3 材料の逆回復特性と逆回復電荷を示している。High-k 材料を用いることで、逆回復時間が短縮され、かつ電荷量を見ると逆回復時の損失が改善傾向を示し大きく特性改善されているてことがわかった。しかし、実際の試作においては、ポリシリコン材料と High-k 材料との相性の悪さも報告されていることから、ポリシリコンゲート材料に代わるメタル材料の電

気的特性の検討を行う必要がある。



(b) 逆回復特性



(b) 逆回復特性

図 4 25℃における逆回復特性と逆回復電荷の特性

5．今後の計画

以下の計画を立てている。

・TEG パターン、レイアウト設計

・2 重拡散プロセスの確立

・初期特性の確認

6．研究成果の発表

2021 年度 8 月、電気学会産業応用部門大会にて発表予定である。