

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 13 号

2019 年度

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。

2019 年度は太陽光発電の出力抑制を回避するためメガソーラーにおける蓄電池の利用、FIT 終了後の家庭での太陽光で発電した電気を有効利用するため住宅用蓄電池の利用が推進され、再生可能エネルギーの利用が拡大されました。本年度末には新型コロナウイルスの流行により自宅待機、テレワークなどが拡がりました。この傾向は、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を垣間見せてくれました。加えて、SDGs が身近な話題となり研究でも持続可能な発展に配慮していくことが求められるようになりました。このように社会情勢が変化するなか、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が多く残されています。本研究所では、各所員が持続可能な自立システムの確立を目指して優れた要素技術の開発に取り組んでおり、本書でその成果の一部を紹介いたします。

なお、研究成果の一部である「スマート PV アレイシステム」を「PV2019 太陽光発電展示会」（7 月 10 日から 12 日：板子教授）に、「オンサイトで水素を発生させる水素暖房（燃焼）システム」を「テクノトランスファーin かわさき 2019」（11 月 13 日から 15 日：矢田准教授）に、そして「外部動力を必要としない制御システムによるサーモサイホンシステムの安定化」を「テクニカルショウヨコハマ 2020」（2 月 5 日から 7 日：川島教授）に出展しました。また、データテクノロジー（株）と共同で開発した「スマート PV アレイシステム」は新聞（日刊工業新聞 6 月 21 日：板子教授）に掲載されました。

目次

はじめに

- ・ 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

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

- ・ 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 黄哲新

- ・ 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

- ・ スーパージャンクション構造を有するチャネル MOS ダイオードの高集積化に関する研究

電気電子情報工学科 工藤嗣友

- ・ IT を活用した学内消費電力モニタと人力発電バイクシステムの開発・運用

情報工学科 田中博

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

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

天気の変化が激しい日本において、太陽光とともに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。しかし太陽熱の有効利用は進んでいない。そこで外部動力を使わずに熱エネルギーを上部から下部に移動させられる熱サイホン（サーモサイホン）、特に、屋根の上に設置した太陽熱コレクタから熱エネルギーを有する比重の軽い温水を地上に移動させる上部集熱式（トップヒート式）熱サイホンに注目し、この熱サイホンの実用化を目指し、課題の1つである作動流体の間欠的な循環を、制御システムにより安定化させることを提案してきた。本研究では、製作した屋外実験装置によるフィールドテストにより制御の可能性を確認する。

2. 研究の必要性及び従来の研究

日本においてここ数年大きな自然災害が多発している。その気候変動の原因として温室効果ガスの増加による地球温暖化が挙げられている。したがって、温室効果ガスの1つである二酸化炭素の削減は喫緊の課題である。この状況を解決するには、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利用する必要がある。現在、太陽光発電、風力発電、地熱発電、バイオマスによる発電等、自然エネルギーによる発電システムが精力的に研究され、実用化されてきている。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力とガスであり、太陽エネルギーの利用でも電力に変換できる太陽光発電が主流である。しかし、天気に左右されやすいうえ、薄雲に太陽が隠れると途端に発電量が減少する、変動を平滑化するために蓄電装置を用いると発電単価が上昇してしまうという課題が指摘されている。一方、温水など低温度の熱で利用されるエネルギーも少なくない。したがって、太陽熱を有効利用できるシステム、すなわち熱サイホンの開発、実用化は重要な課題である。

熱サイホンには、毛細管方式、浸透圧方式、蒸気圧方式、蒸気泡ポンプ方式などがある。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。本研究では、構造が簡単な蒸気泡ポンプ方式を対象とする。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熱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

による実証実験から、朝や夕方の太陽熱が少ない状況において、熱の移動、すなわち作動流体の循環が間欠的となる。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サーモサイホン実験装置を用いた屋内実験により作動流体の間欠的な循環を安定化させられることを確認してきた⁽⁷⁾。提案している制御システムは、管内圧力を下げることで沸点を低下させて作動流体の間欠的な循環を安定化させるもので、エナジーハーベストによる電力を用いることで外部電力を必要としないサーモサイホンの特徴を生かしたシステムとなる。本研究では、本システムの実用化を目指し、製作した屋外実験装置によるフィールドテストにより、提案している制御システムの有効性を確認する。

- (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 (2003-3), 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)*, (2007-9), 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.
- (7) Fujisawa, T., Kawaguchi, T. and Kawashima, T., “Basic Study on Flow Stabilization of Top-heat-type Thermosiphon”, *Proceedings of 12th International Conference on Solar Energy for Buildings and Industry (EuroSun2018, ISES)*, (2018) (Rapperswil, Switzerland), doi:10.18086/eurosun2018.10.15.

3. 期待される効果

現在、あまり利用されていない再生可能エネルギーである太陽熱を、温水など低温度の熱エネルギーとして直接得ることができ、併せてその制御システムを構築することで熱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ナジ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のみでの運

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・評価

4-1 サーマサイホン実験模型

サーモサイホン屋外実験模型の写真を図1に示す．凝縮器でヒータからの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，作動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．

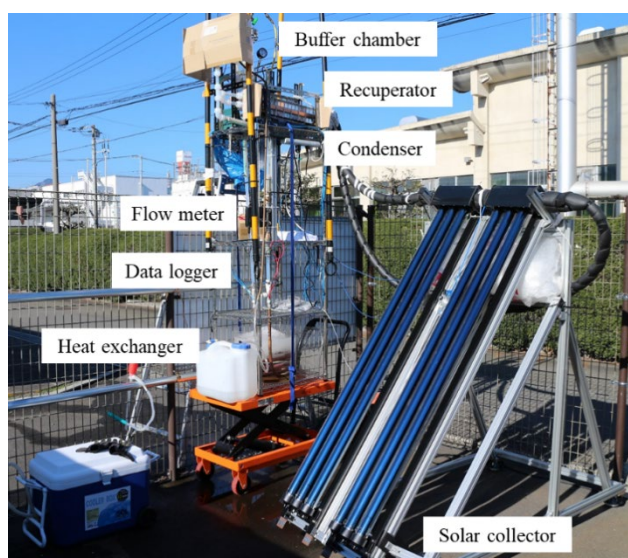


図1 上部集熱式サーモサイホン屋外実験装置

4-2 屋外実験の結果と考察

冬の快晴の日の実験において，日射量が多く，十分な熱エネルギーが供給される場合は安定した流動が実現されることを確認した．

春の霞がかった晴天の日にヒートパイプ3本（ヘッダー入り口側の3本はブルーシートでカバー）で実験した結果，日射量が弱く，供給熱エネルギーが少ない状態では作動流体（循環水）の間欠的流動が生じることを確認した．間欠的流動は，太陽集熱器で加熱された作動流体が沸騰して蒸気の浮力で循環水が流動を始めるが，供給熱量が少ないため新たに太陽集熱器のヘッダーに入ってきた作動流体を連続的に蒸発させるこ

とができず、沸騰が止まる．そして加熱されて再度沸騰が始まり流動することが繰り返されて間欠流が生じると考えられる．したがって、サーモサイホンシステムに熱量を加えることで間欠流を抑えられる．しかし、再生可能エネルギーの供給熱量を変化させることは難しい．そこで、沸騰が低温で生じるよう必要に応じて管内圧力を下げることで連続的な流動を実現する制御法を提案している．

次に、作動流体が定常に流れているとき、作動流体の圧力を-42 kPa から-68 kPa に下げて沸点を下げることにより速い定常流を実現できること、すなわち少ない供給熱量でも沸点を下げることにより速い連続的な流れを実現できることを確認した．

そして、図2に、44.2 分ごろから徐々に管内圧力を下げた場合の実験結果を示す．35.4 分から間欠的な流動が生じ、作動流体の圧力を-75 kPa から-90 kPa に下げることによって、管内の温度が定常になるまで間欠流が続くが、その後、連続的な流れとなることが確認できる．この結果より、熱エネルギーが入力が少なく、作動流体が間欠的に流動しているときに管内圧力を下げて沸点を下げることによって、間欠流を抑えられることが確認できる．

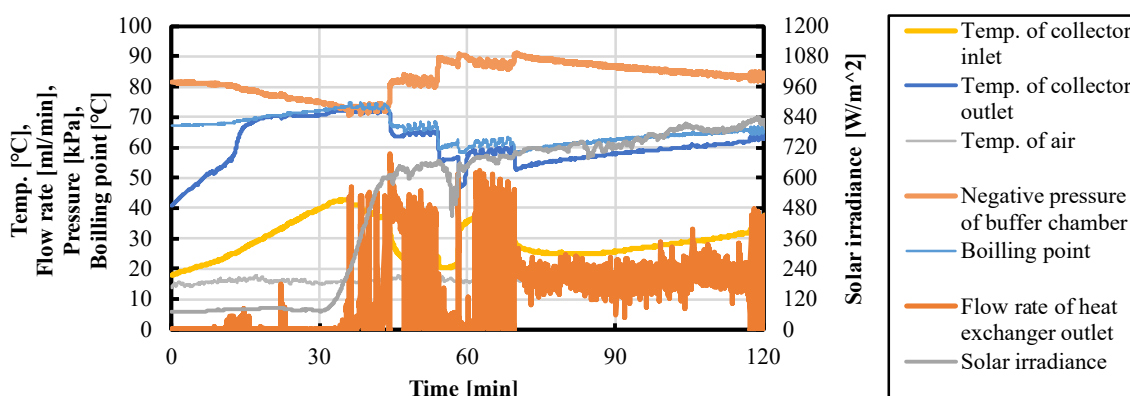


図2 屋外実験結果（管内圧力を徐々に下げた場合）

5. 今後の計画

1. 太陽光発電による制御システムへの電力供給，すなわち，エネルギーハーベスティングによる電力供給を実現する．そして、屋外用サーモサイホン実験模型によりシステムとしての有効性を確認する．
2. 作動流体を駆動する原理をさらに解明するため、静電容量型水位計により液溜めの水位を測定して蒸気泡の量と作動流体の流速の関係を明らかにする．そして、蒸気泡ポンプ方式サーモサイホンの正確なモデルを構築し、制御方法の有効性をシミュレーションにより確認する．
3. 熱伝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、コンパクトなエネルギーハーベスティングを目指す．

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の動作特性, 第 29 回環境工学総合シンポジウム 2019, No.J407.

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

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する。2020 年度は, 各ユニット間の通信シス

テムを構築し、家庭用システムを想定した規模の大きい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する予定である。

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 P_{MAX} 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 P_0 と呼ぶこととする。一般に、最大電力 P_{MAX} は P_0 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 P_{MAX} 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 P_0 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 P_0 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

2019 年度は、まず新しく提案するアクティブ PV アレイの基本原理の有効性を実証した。図 1(a) は従来システムを示している。図 1(b) が提案するアクティブ PV アレイシステムの

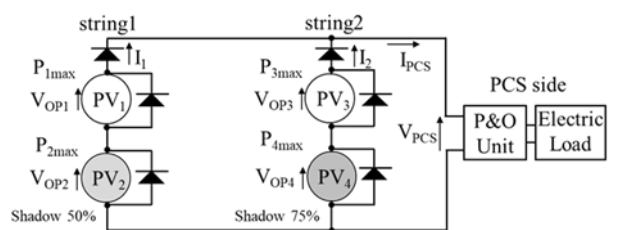
構成を示している．同図(b)に示すように各パネルに制御ユニットを接続し，2枚のパネルを直列に接続してストリングを構成し，2つのストリングを並列に接続したアクティブ PV アレイの基本構成システムの数値シミュレーション

を行い，ユニットを接続しない従来アレイと比較して，提案システムの P-V 特性の最大値が 1.66 倍に増加することを明らかにした．次に，小規模のパネル構成で実験を行った．まず，ユニットの制御のためのプログラムを開発した．本実験では，図 1(b)のユニット 1～4 に昇降圧形 DC-DC コンバータを用いる．制御には申請購入したマイクロプロセッサである最新の DSP 制御ボードを用いて複数のユニットを同時に制御することができた．構築したシステムを用いて，パネルに影のない安定状態から急激に影を付加して変化を与えて出

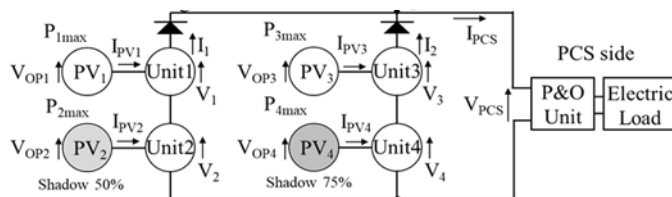
力電力のステップ応答特性を測定し，急激な環境変動に対して全てのパネルが最大電力点での動作を維持できることを確認した．図 2 は長時間での電力取得特性を従来アレイシステムと比較したものである．取得電力量で比較すると従来システムは 289.3Wh であるのに対して提案システムは 462.5Wh となり，約 1.6 倍取得電力量を増加させることができた．これらにより，本提案のアクティブ PV アレイシステムの基本原理の有効性が実証された．

5. 今後の計画

2020 年度は実用システムを想定し，アレイ規模を大きくした実証試験を行うことで本提案システムの実用性を検証する．また，各ユニットの発電電力を監視するためのモニタリングシステムも構築する．これらの成果は，国内外の学会や展示会などを通して社会に情報を発信する予定である．



(a)従来の PV アレイシステム



(b)提案するアクティブ PV アレイシステム

図 1 PV アレイシステム

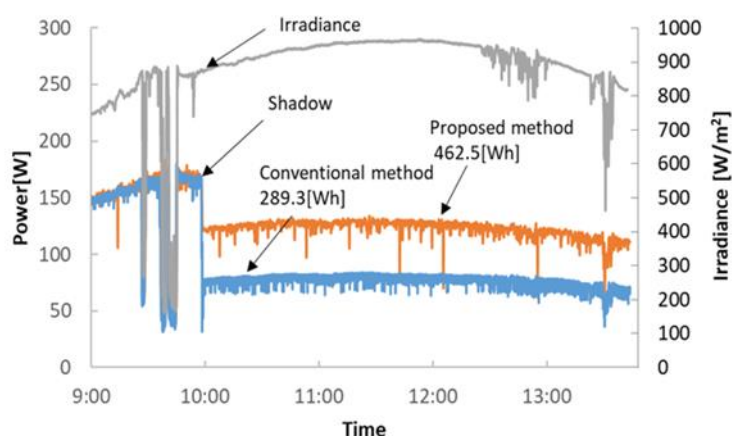


図 2 電力取得特性

6. 研究成果の発表

〈学会・展示会〉

【国際学会】

(1) K. Itako, Y. Takeda and T. Kudoh

“Proposal of Active PV Array for PV Generation System” Proceedings of ICEE 2019, (4pages) (査読付)

(2) K. Itako, Y. Takeda, T. Kudoh and K. Koh “Improvement of Power Acquisition Characteristic on PV Generation System by Using Active PV Array” ICFEE 2020, (8pages) (査読付)

【展示会】

(1) PV2019 太陽光発電展示会&フォーラム 2019 7/10～7/12 (パシフィコ横浜) (展示)

(2) イノベーション Japan2019 2019 8/29, 8/30 (東京ビッグサイト青梅展示棟) (展示)

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 ー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ー

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に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、システムを単純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単純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。さらなる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

(1) 需要対応型 MPPT 制御

需要対応型 MPPT 制御に関しては、基礎検討を行うために一般家庭の夏の需要データの一例を用いた。まず、得られた負荷の変動に対する適切な動作点を検出するためのアルゴリズムを構築した。さらに、図 1 に示すように購入した DC-DC コンバータを用いてスキャン法の電力スイープ動作により負荷電力と合致する動作点を検出し、その動作点で動作させることに成功した。また、負荷の変動に対して適切に追従できることが実験により確認された。この成果は、シンポジウムにて発表を行った。

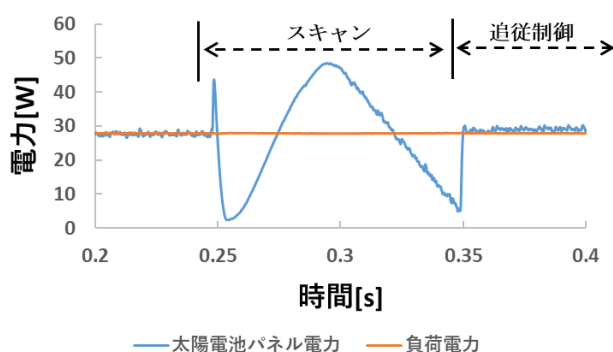


図 1 需要対応型 MPPT の動作波形例

(2) AI によるパネルの不具合検出法

システムの信頼性向上のためのパネルの不具合検出システムについては、まず、ストリングシステムの不具合検出を AI を用いて行うことを試みた。図 2 は今回用いた Neural network の概念図である。本実験の AI は入力層と隠層が 90 ノードから構成されている。ホットス

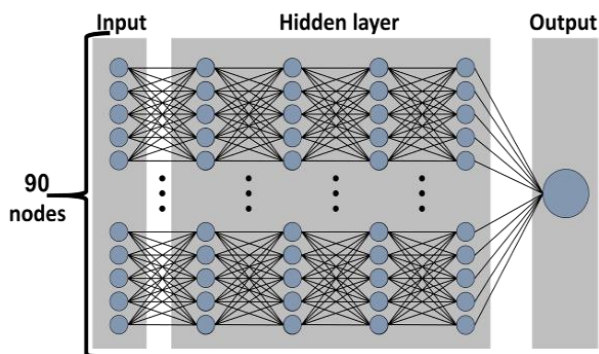


図 2 Neural network の概念図

ポットがあるかどうかを1か0で出力するようなAIのため出力層は1つのノードとなっている。今回は Adam というソルバーを使用している。図3に示すPVストリングを用いて実験を行ったところ、図4に示すように、この提案システムではアレイの電圧と電流だけで85%程度の確率で不具合を検出できることが明らかとなった。この成果は国際学会ICFEE2020にておいて発表を行った。



図3 実験に用いた PV ストリング

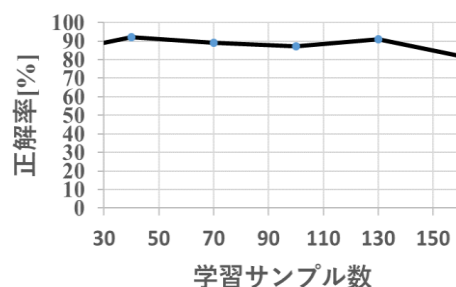


図4 学習サンプルに対する正解率

一方、セルデバイスの不具合の検出に関しては、暗状態におけるセルの静特性と逆バイアス時におけるセル表面の温度観察を行い良好・不良セルの分類を教師ありの機械学習にて分類を行った。機械学習で使用したツールは Mathworks 社の MATLAB、測定で使

用したセルデバイスの枚数は 120 枚である。静特性の測定項目は、順方向のオン電圧(目標電流に達したときの電圧値)と逆方向リーク電流(ある任意の電圧値のときの電流値)、C-V 特性よりダイオード成分の内蔵電圧と基板密度の項目で電気的評価を行った。図5は、先ほどの測定項目から得られたデータを機械学習で得られた結果の1つである。横軸はオン電圧値、縦軸は基板密度である。良好セルはオン電圧が低くかつ基板密度が低い所で分布する傾向があり(図5グラフの左下の分布)、一方で不良セルの傾向としてオン電圧が大きく、基板密度が大きい傾向が見られ(図5グラフの右側の分布)、データセット数が少ないが機械学習によるセルの良好・不良セルの分類ができるようになった。図6は、データセットを元に、セルの良好・不良セルの簡易的判定アプリを開発した。2点のリーク電流値を入力することで判定することが可能である。この判定アプリを開発したことにより、判定時間の大きな短縮が可能となり、正解率も約8割と高い結果が得られた。しかし、セルデバイスのデータセットによっては、良好・不良のどちらかにも当てはまらない場合の判定に課題が残った。

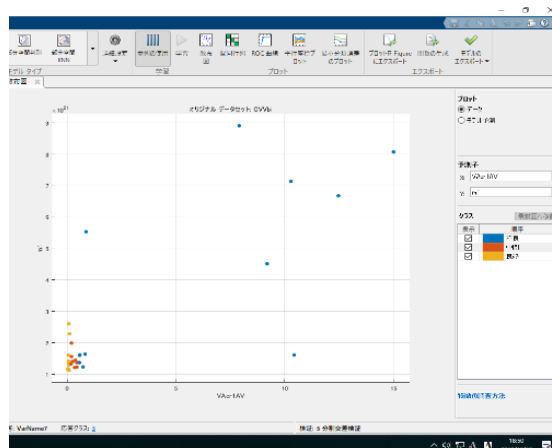


図5 機械学習で得られた結果

この原因としては、セットデータの数
が少ないことや電氣的諸特性以外の物
理現象を機械学習させていなかったこ
とが考えられる。

そこで、研究分担者は、図 7 に示す
ような畳み込みニューラルネットワ
ークをツール上で構築し 100 枚のサーモ
グラフィーを学習させホットスポット
の判定を行った。中間層は、サーモグ

ラフィーから得られた表面温度を温度別に色分けし、そのときの各温度の面積を求め、その
面積の広さを特徴量として抽出し学習させた後、分類するようにしている。図 8 は、学習結
果を利用して、新たに撮影した画像を判定した結果を示している。左図は、ホットスポット
の発生が 99.1%発生していないことを示し、中央は 78.2%の確率で発生していることを示し、
右図は 98.6%の確率で発生していることを示している。以上より、学習させた畳み込みニュー
ラルネットワークを用いることで太陽電池セルのホットスポットを分類することが可能
であることがわかった。この画像判定の問題点としては、図 8 の中央部の結果である。70%
以上の確率でホットスポットが起こると判定されているが、画像を見る限りでは高温を示
す赤い領域が見られていない。よって、判定精度を上げるためにも、より多いデータセット
が必要と考えられる。

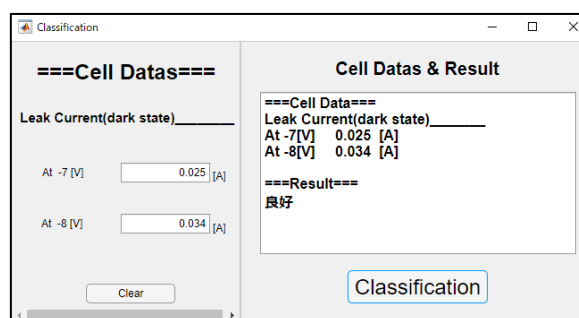


図 6 判定アプリの画面

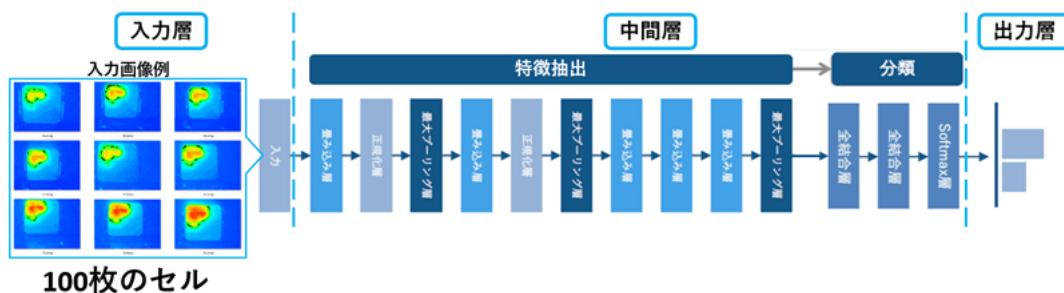


図 7 本研究で採用した畳み込みニューラルネットワークの動き

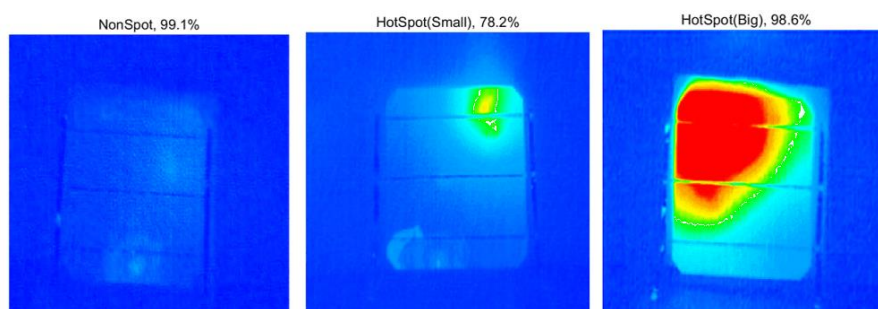


図 8 分類した結果

5. 今後の計画

太陽光発電システムの MPPT 制御においては、全体システムの開発を行い、エネルギー蓄積要素の充放電特性を明らかにし、その効性を検証する予定である。

パネルの不具合検出システムにおいて、ストリングレベルでの検討では、リアルタイムで検出するためのシステムを構築し、有効性を検証する。セルレベルでの検討では、サーモカメラにより得られた画像と時系列データからディープラーニングなどを用いて前年度取得した大量の基礎実験データを基に不具合の分析検出を試みる。

6. 研究成果の発表

〈学会・展示会〉

【国際学会】

(1) K. Itako and A. Alhabib, "A New Method of Detecting Hot Spots in PV Generation System Utilizing AI", Proceedings of ICSEE 2020, (6pages) (査読付)

【展示会】

(1) PV2019 太陽光発電展示会&フォーラム 2019 7/10～7/12 (パシフィコ横浜) (展示)

スーパージャンクション構造を有するチャネル MOS ダイオード の高集積化に関する研究

研究者名：電気電子情報工学科 氏名 工藤 嗣友

1. 研究の目的

ULSI 向け電源や太陽電池向けバイパスダイオードに使用されるダイオードは、ショットキーバリアダイオードが一般的である。しかし、このダイオードは、安価で低電圧で駆動できる一方で高温状態において熱暴走を起こす問題がある。我々は、ショットキーバリアダイオードに代わるダイオードとしてチャネルダイオードと呼ばれる MOSFET 構造のダイオードを図ったデバイスを提案している。しかし、このデバイスはオン電圧と耐圧のトレードオフがあり改善が求められる。

近年、パワー MOSFET デバイスでは、ユニポーラデバイスを中心とした上記トレードオフの改善を可能としたスーパージャンクション構造が提案し、改善出来ることが報告されている。さらに、スーパージャンクション構造(SJ)の工夫を図ったデバイスも開発されており、より低オン電圧化で高耐圧化が実現されている。しかし、高集積化を図るための設計を行おうとすると、ソース領域の設計が困難となる。この領域の構造を検討しオン電圧と耐圧のトレードオフの改善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

一般的なスーパージャンクション構造(SuperJunction：以降 SJ 構造)を図 1 に示す。SJ 構造の設計では、一般的に n ピラー、p ピラー共に同密度、かつ同じ幅で設計を行うのがもっともトレードオフの改善に適している。図 1 の構造の集積化を行う方法としては、pB 層の深さを浅くしながらゲート長を短くし横方向に拡散する距離を短くすることで集積化を図る方法が一般的ではある。しかし、この方法では、2 重拡散構造の各接合間の距離が狭

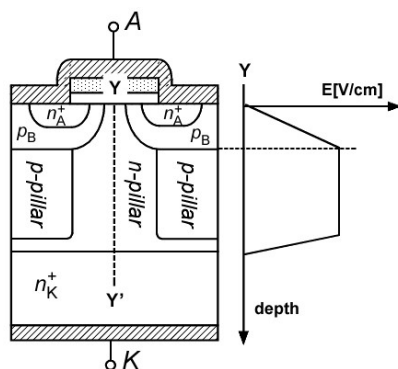


図 1 高耐圧化に適した断面構造(SJ-SBCD)と電界分布

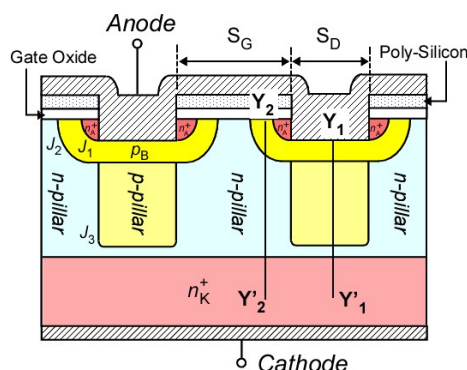


図 2 ソース領域に新構造を有する構造

くなり、それによって空乏層が広がりやすくなりパンチスルーの影響により耐圧が劣化する問題が生じた。この問題を克服する構造として図 2 の構造を提案した。ソース領域は、トレンチ構造を有しトレンチに埋め込み電極を設けた構造となっている。

3. 期待される効果

提案デバイスは、MOS 構造でアノード側に 2 重拡散構造を有しゲート電極とアノード電極とが短絡された構造となっている。SJ-SBCD は、p ボディ層直下に p ピラー層、そして MOS ゲート直下に n ピラー層を設け交互に配置した構造となっている。ソース領域では、n⁺層と同じ深さの浅いトレンチ構造を採用している。これは、隣同士の n⁺層が接触し集積化を困難になる問題がある。本デバイスは、低オン電圧を得るために、不純物密度と酸化膜厚さを調整することでしきい値電圧がコントロールできるので 0[V]でも弱い n チャネルが形成できるように設計している。

4. 研究の経過及び結果・評価

図 3 は、p ピラー不純物密度を変化させたときの 75°C における 1[A] 時のオン電圧を示す。オン電圧は、ピラー不純物密度が高くなるに従って増加する傾向にあるがその差は最大で 4[mV] 弱と小さい結果が得られた。これは p ピラー不純物密度が高くなることにより、空乏層が p ピラー側から n ピラー領域への広がりが大きくなるため、電流通過領域の幅が狭くなるからと考えられる。このことから、p ピラー不純物密度の変化は順方向特性にほとんど影響を与えないと考えられる。

図 4 は、p ピラー不純物密度を変化させたときの 75°C における -5[V] 時のリーク電流値を示す。この結果より、p ピラー不純物密度を高くしてもリーク電流の影響を大きく受けないことを示している。8.0×10¹⁵[cm⁻³]と 1.6×10¹⁶[cm⁻³]との間で 0.06[mA] 程度低下が見られている。これは、p ピラー不純物密度が低いほどピラー接合部の少数キャリアによるリーク電流が若干高いためと考えられる。1.6 × 10¹⁶[cm⁻³]より不純物密度を高くすると、ほぼ差は見られない結果が得られている。

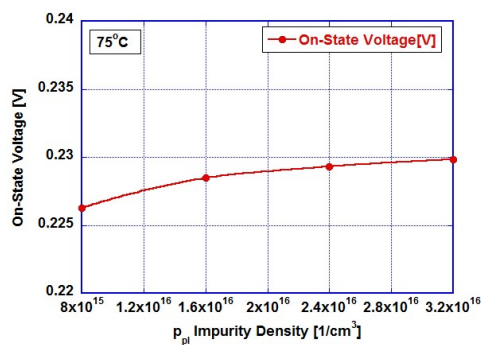


図 3 1A 時のオン電圧地

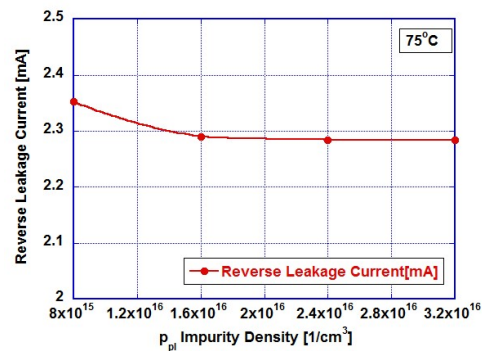


図 4 p ピラー密度によるリーク電流

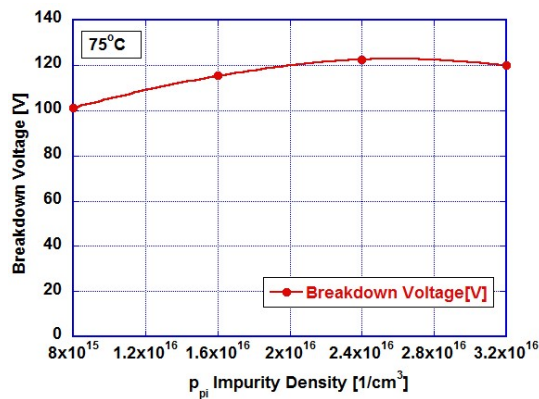


図 5 p ピラー密度による耐圧値

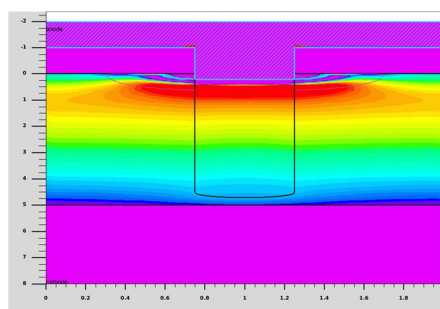
図 5 は、p ピラー不純物密度を変化させたときの 75°C における耐圧の結果を示す。耐圧は、 $8.0 \times 10^{15} [\text{cm}^{-3}]$ で 100[V]、 $2.4 \times 10^{16} [\text{cm}^{-3}]$ で 122[V] の最大値をとり、さらに濃度を高くし $2.4 \times 10^{16} [\text{cm}^{-3}]$ で 120[V] と少し減少している。さらに不純物密度を高くすると耐圧が減少することが予想される。これは、不純物密度が高い領域内において、空乏層が広がりにくく接合部の電界が集中しやすくなるためである。耐圧シミュレーションの結果より、最適な耐圧値を得るための p

ピラー不純物密度 p_{pi} の計算式は、以下で与えられる。

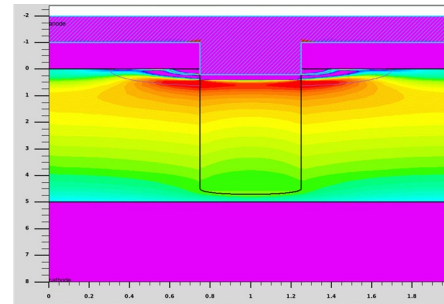
$$p_{pi} = \frac{S_D}{S_G} \times n_{pi} \quad \dots (1)$$

ここで、 S_G はゲート長、 S_D はソース領域の幅、 n_{pi} は n ピラー不純物密度である。

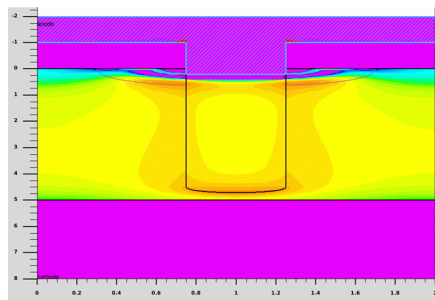
図 6 は、各 p ピラー不純物密度に対するブレイクダウン直前の 2 次元電界分布を示す。



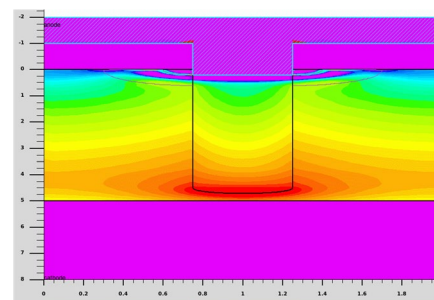
(a) $p_{pi} = 8e15 [\text{cm}^{-3}]$



(b) $p_{pi} = 1.6e16 [\text{cm}^{-3}]$



(c) $p_{pi} = 2.4e16 [\text{cm}^{-3}]$

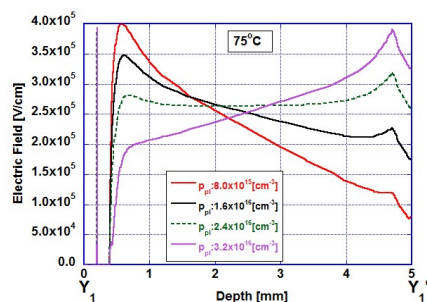


(d) $p_{pi} = 3.2e16 [\text{cm}^{-3}]$

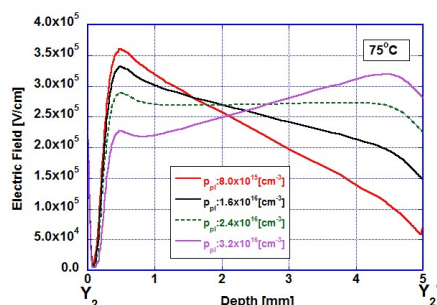
図 6 ブレイクダウン直前の電界分布

p ピラー不純物密度が $8.0 \times 10^{15} [\text{cm}^{-3}]$ 、 $1.6 \times 10^{16} [\text{cm}^{-3}]$ では、 J_2 接合のコーナー部分に電界

が集中している。この原因は、各ピラー幅が異なるため、先に p ピラー層内で完全空乏化され電界が緩和されるが、n ピラー層内では完全空乏化されておらず J_2 接合のコーナー部分に電界が集中したと考えられる。p ピラー不純物密度が $2.4 \times 10^{16} [\text{cm}^{-3}]$ において、ブレークダウン直前では p ピラー層、n ピラー層内部が、それぞれ完全空乏化されているため目立って電界が集中する箇所が見られなかった。そのため、耐圧が最も高くなったと考えられる。p ピラー不純物密度が $3.2 \times 10^{16} [\text{cm}^{-3}]$ では、p ピラー層底部で電界が集中している。これは、p



(a) Y1-Y1 ライン



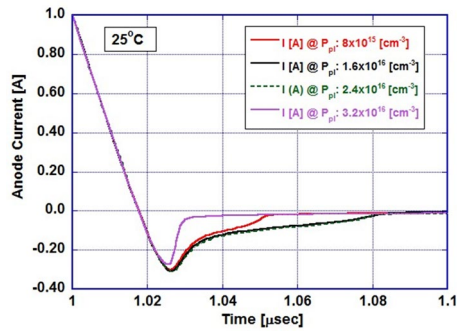
(b) Y2-Y2 ライン

図 7 電界分布

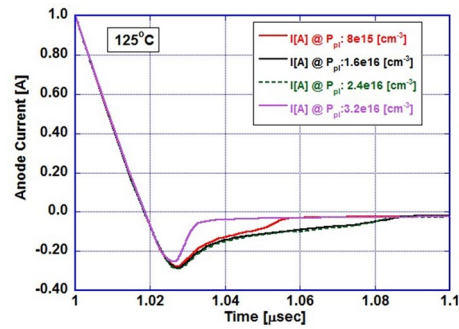
ピラー層が n ピラー層よりも不純物密度が高いため、空乏層の広がりには n ピラー層側のほうが先に完全空乏化される。p ピラー層内の空乏層は、広がりにくいため p ピラー底部に電界が集中しやすくなっていると考えられる。

図 7 は、図 2 に示す Y1-Y1 と Y2-Y2 の位置で 4 種類の p ピラー不純物密度におけるブレークダウン直前の電界分布を示す。デバイスの電界強度を見ると、p ピラー層内の電界は n ピラー層よりも全体的に大きく、デバイスの耐圧を支配していると確認できる。以上より、耐圧に関しては、p ピラーの不純物密度と幅に最適な値が存在することが分かった。

図 6 は、p ピラー不純物密度を変化させたときの 25°C と 125°C の逆回復特性をそれぞれ示す。シミュレーションの入力波形は、順方向電流を 1[A] になるように順方向電圧を設定し、その状態で逆方向 -5[V] までスイッチングさせた。p ピラー不純物密度が $1.6 \times 10^{16} [\text{cm}^{-3}]$ と $2.4 \times 10^{16} [\text{cm}^{-3}]$ のときの逆回復時間は、テール電流が長いがほぼ同じである。一方、p ピラー不純物密度が $3.2 \times 10^{16} [\text{cm}^{-3}]$ のときは、25°C と 125°C 共に速やかに回復した結果が得られる。これは、p ピラー密度が高くなると、ピラー層内の抵抗値が下がるので正孔電流が流れやすく、速やかにアノード側へと排出しやすくなったと考えられる。p ピラー不純物密度が $8 \times 10^{15} [\text{cm}^{-3}]$ の時は、順方向時における正孔の注入量が他の不純物密度より少ないため、ターンオフ時においては速やかに回復したと考えられる。



(a) Y₁-Y'₁ ライン



(a) Y₁-Y'₁ ライン

図 6 逆回復特性

5. 今後の計画

提案したスーパージャンクション構造チャネル MOS ダイオードは、以下の項目を実施し電気的特性の改善を進めていきたい。

- ・ p ピラーと n ピラーの幅を 1:1 にした時の電気的特性解析
- ・ ピラー密度と幅の電気的特性解析

TEG パターン設計

6. 研究成果の発表

(1) T. Kudoh, H. Tsushima, and F. Sugawara, “Simulation Analysis of Super-Junction Self-biased Channel Diodes with Shallow Junction”, 25th International Conference on Electrical Engineering 2019, ICEE19J-045, Hong Kong.

IT を活用した学内消費電力モニタと人力発電バイクシステムの開発・運用

研究者名：情報工学科 田中 博

1. 研究の目的

学内電力の利用状況のモニタ、最適化やトレーニング・健康維持を目的とした人力発電による学内への寄与と、新たに本学での創生する再生可能エネルギーを学内で有効利用（地産地消）することによる SDGs を推進する施策を開始する。

(1) 学内使用電力のモニタと電力利用の最適化

学内の電力利用の最適化のためには、現状の分析が必須である。このため、H24 年度に開発した学内使用電力のモニタシステムの運用を継続し、使用電力状況のデータを蓄積する。

(2) 人力発電バイクシステムの運用（開発完了済）と発電電力の有効活用

運用中の人力発電システムのコンセプトを図 1 に示す。発電バイクの利用による発電電力はバッテリーに蓄えられ、このバッテリーを介してエネルギーへの充電が可能である。使い捨て型の乾電池から、循環利用可能なエネルギーの学内利用を推進し、ECO 活動に寄与する。バッテリーは災害時における避難所の電力供給として使用する。SDGs の取り組みの一環である。

(3) 再生可能エネルギープラットフォームの検討

本学の太陽光発電、熱交換発電の研究成果を用いて創出した電力の学内利用を可能にするシステム・仕組みを構築し、SDGs の Good Practice として具現化する。

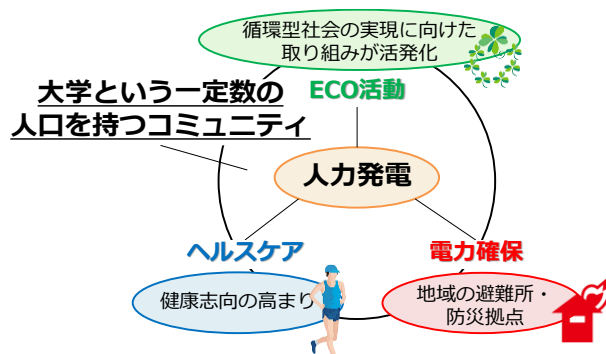


図 1 人力発電システムのコンセプト

2. 研究の必要性および従来の研究

(1) 学内使用電力のモニタと電力利用の最適化

震災以降、製造現場を持つ企業をはじめ自治体などでも電力利用の最適化は進められている。このため H24 年度に開発したシステムを、電力の利用状況のデータ取得の位置づけで、継続して運用を行っている。

(2) 人力発電バイクシステムの運用（開発完了済）と発電電力の有効活用

人力発電バイクは、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過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。我々は図1で示したように“ECO活動”，“ヘルスケア”，“避難所での電力確保”という観点からの利用を目標している。「防災や災害時対策は日常に組み込ませる」ことが重要であり，発電電力を平時には日常で，災害時には特定の用途で使用することで，システムの意義があることになる。平時では充電したエネルギーの学内利用によるECO活動を推進し，災害時には避難所としての電力提供（スマホ充電スポットの提供等）を実現する。

(3) 再生可能エネルギープラットフォームの検討

上記(1)と(2)の開発は完了している。本学の個々の研究成果をとりまとめ、一元的に学内で創生する再生エネルギーを学内利用する新たなプラットフォームを提案する。本学は自転車を利用する学生が多いことを踏まえ、発電電力を電動アシスト自転車へ利用することができれば、学生へのサービス提供、負担の軽減になると考えられる。

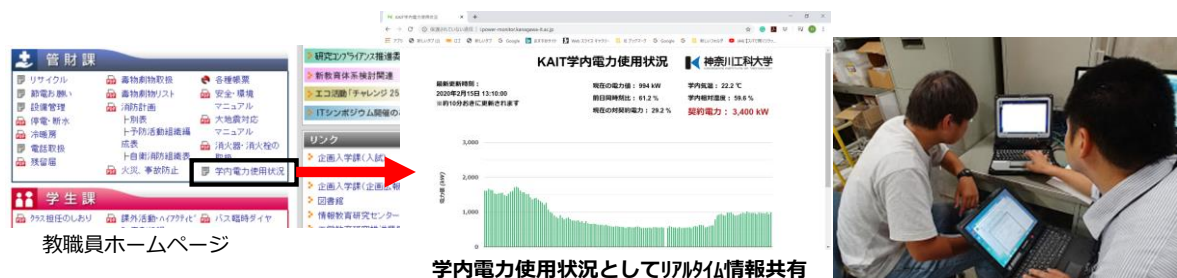
3. 期待される効果

取り組み(1)を継続し，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。実際，夏季の使用電力量が契約電力を超過しそうになったときは，学内に周知し超過を回避することができた実績がある。(2)に関しては，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る一つのECO活動として寄与できる。ユーザの定常的な利用により，健康促進にもつながる。また，一定の充電容量のバッテリーに充電することにより避難所の電力確保にもつなげることができる。(3)に関しては，学内の電力の地産地消に加え，一部のアシスト自転車に RTK-GPS、加速度センサを搭載することによって路面情報を取得し、地図（GoogleMap）上への共有により安全確保に寄与する。

4. 研究の経過及び結果・評価

(1)学内電力見える化システムの運用

本学ホームページの教職員向け情報の管財課の箇所にリンク設定されている“学内電力使用状況”(<http://i.power-monitor.kanagawa-it.ac.jp/>)の保守運用を行っている。今年は、停電期間中におけるサーバのON/OFF、Win7からWin10サーバへの更新を行った。



<http://i.power-monitor.kanagawa-it.ac.jp/>

図1 学内電力使用モニタとWin7からWin10への移行作業

(2) 人力発電バイクシステムの運用（開発完了済）と発電電力の有効活用

KAIT アリーナ、ECO 推進室に設置している上記システムの運用を行っている。発電電力のモニタ画面（<http://kait-humanpowergeneration.appspot.com/>）とエネループ（再利用型の蓄電池）の循環利用の体制を図 2 に、エネループの 2019 年における学内の循環利用を表 1 に示す。一定レベルの循環利用が行われている。一方で、ユーザと運用体制の確保が課題となっている。

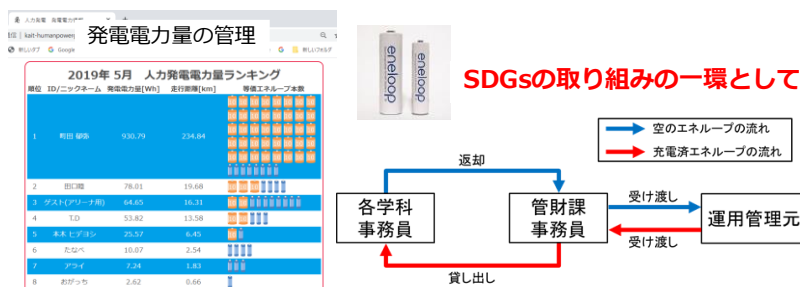


図 2 発電電力のモニタ画面とエネループの循環利用の体制

表 1 エネループの学内循環利用状況

貸出し		返却		
単三型	単四型	単三型	単四型	
240	154	110	97	2018年1月～2018年12月
210	162	218	150	2019年1月～2019年12月

(3) 再生可能エネルギープラットフォームの検討

学内の太陽電池による発電電力の有効活用として、電動アシスト自転車への利用を提案する。これは学内の駐輪場などでの太陽電池による発電電力を自転車のバッテリーに供給するものである。駅から本学までの自転車利用時の負荷を低減するとともに、駐輪場の空空間を利用したエネルギー創生とその有効利用の事例となると考えている。本提案では、エネルギーの循環利用とともに IT システムとの連携を考慮する（5 章、今後の計画に記載）。

2019 年は、高精度な位置検出が可能である RTK-GPS の適用の検討に着手し、以下の成果を得た（図 4）。

- ・ RTK-GPS 基準局情報（R 科吉留准教授設置）を利用した、高精度測位の確認と評価
- ・ 取得した測位情報のクラウドへの格納と地図上への表示

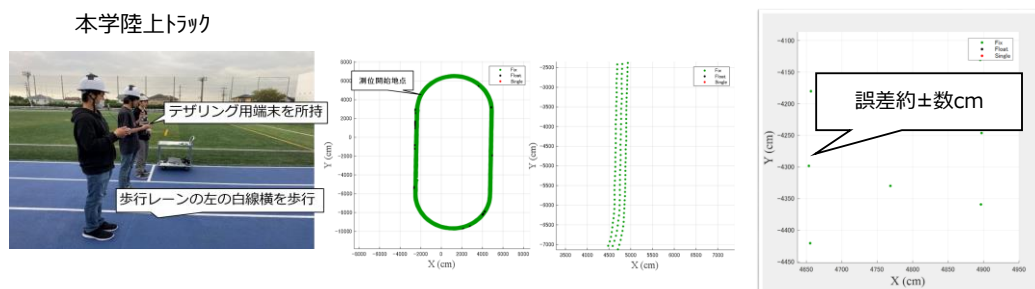


図 4 RTK-GPS による測位精度評価実験結果

5. 今後の計画

引き続き学内使用電力のモニタシステムの運用を、人力発電システムの運用と学内でのエネルギーの循環利用の促進を継続する。人力発電システムに関しては利用者の状況を見て、来年度以降の運用継続の判断を行う。

2020年度は、2019年度より着手した下図に示すプラットフォームの実現と実利用を目標に、必要となる以下の要素技術の検討を行う。提案の理念は、SDGsへの寄与と路面情報の取得と共有による地域貢献である。

- (1) RTK-GPSによる測位データと連動した加速度データの取得方法と実装
- (2) 加速度データからの路面状態の推定、評価
- (3) 道路状態をGoogleMap上への可視化
- (4) 駐輪場屋根への太陽電池パネルの設置の可能性の検討と発生電力予測

再生可能エネルギープラットフォーム － KAIT電動シェアバイクへの適用 －

取り組みのねらい

- ・学内で創成する再生可能エネルギーの有効利用 －電動アシストバイク－
- ・高精度な位置情報、路面状態の取得と可視化、共有 －GoogleMapへの反映－
- ・本学のSDGs活動の具現化 －皆の目に見える形で－



図5 再生可能エネルギープラットフォームの基本構想

6. 研究成果の発表

(1) 小川 真輝, 下川 元暉, 門倉 丈, 吉留 忠史, 田中 博, “RTK-GPS 測位のグラウンド内位置検出への適用性の基本検討”, GPS/GNSS シンポジウム 2019, 1 page.