

ハイブリッド発電型のフィールドセンサ杭システム

立野 倫太郎^{1,a)} 竜田 藤男^{1,b)} 岩井 将行^{1,c)}

概要: 近年激甚化している豪雨による土砂災害に対して、二次災害の検知、監視を行う斜面監視用のセンサ杭システムが登場している。その多くはデータ取得を行うセンサ杭と、そのデータをユーザーやクラウド上に送信する中継端末に分かれており、特にセンサ杭では一次電池を使用した運用が中心となっている。そのためセンサ杭システムの連続可能計測時間が1年程となっており、定期的なバッテリー交換が必要とされてきた。環境発電を用いたセンサ杭への給電方法が望まれるが、センサ杭は複数のポイントに設置するため、独立した太陽光発電装置などの場合、センサ杭は発電装置に合わせた設置箇所の選定が必要となってしまう。そのため、本研究では杭の側面にソーラーセルを取り付ける多方面太陽光発電を用いた、センサ杭に搭載可能な持続的給電を行える太陽光発電システムの開発を行った。さらに太陽光発電は天候などの外環境によって発電量が不安定となる場合があり、このような充電能力が発揮されなかった対策として、センサ杭と同程度の大きさの小型風力発電機と予備二次電池及び制御用マイコンを搭載した予備給電システムを開発する。予備給電システムは、LoRa通信を用いて定期的にセンサ杭の充放電量を監視し、二次電池の放電推移を予測、必要に応じて各センサ杭に対し、風力発電によりあらかじめ充電された予備給電システム内蔵バッテリーから予備給電を行う。本システムを搭載するセンサ杭の想定として、河川の堤防決壊の兆候検知を行う目的のセンサ杭を実装し、その消費電力量と本研究で開発した給電システムの発電電力量の比較・検証を行った結果を報告する。

1. はじめに

近年激甚化している豪雨による土砂災害に対して、二次災害の検知、監視を行う斜面監視用のセンサ杭システム [1][2] が登場している。その多くは、データ取得を行うセンサ杭とそのデータをユーザーやクラウド上に送信する中継端末に分かれており、特にセンサ杭では一次電池を使用した運用となっている。そのためセンサ杭システムの連続可能計測時間が1年程 [3] となっており、定期的なバッテリー交換が必要とされてきた。環境発電を用いたセンサ杭への給電方法が望まれるが、センサ杭は複数のポイントに設置するため、独立した太陽光発電装置などの場合、センサ杭は発電装置に合わせた設置箇所の選定が必要となってしまう。

したがって、本研究では杭の側面にソーラーセルを取り付ける多方面太陽光発電 [4] を用いた、センサ杭に搭載可能な持続的給電を行える太陽光発電システムの開発を行った。また、太陽光発電は天候などの外環境によって発電量が不安定となりやすい。このようにセンサ杭にて充電能力

が十分に発揮されなかった際の対策として、センサ杭と同程度の大きさの小型風力発電機と予備二次電池及び制御用マイコンを搭載した予備給電システムを開発する。予備給電システムは、LoRa通信を用いて定期的にセンサ杭の充放電量を監視し、二次電池の放電推移の予測を行う。その予測によりセンサ杭の充電率の低下が見込まれる場合、当該のセンサ杭に対し、風力発電によりあらかじめ充電された予備給電システム内蔵バッテリーから予備給電を行う。本稿ではこれら太陽光発電システム及び風力発電を用いた予備給電システムを組み合わせた、ハイブリッド発電型センサ杭給電システム (HyPoS) を提案する。HyPoSを搭載するセンサ杭の想定として、河川の堤防決壊の兆候検知を行うセンサ杭 [5] を実装し、その消費電力量と本研究で開発した給電システムの発電電力量の比較、評価を行い、HyPoSによりフィールドセンサ杭の長期的な稼働が可能となるか検証を行う。

2. 関連研究

2.1 環境発電を用いたフィールドセンシング

西川らは、山間部で用いられるデータ観測機器において、各ノードからシンクノードへ電池残量とホップ数を送信し、シンクノードは次回通信時の電池残量予測、送信経

¹ 東京電機大学
Tokyo Denki University

a) ritu@cps.im.dendai.ac.jp

b) tatsuta@mail.dendai.ac.jp

c) iwai@cps.im.dendai.ac.jp

路を決定する経路制御法を提案している [6]。石谷らは、太陽光発電を用いた無線センサネットワークにおいて、電池残量の少ないノードからセンシング頻度を制限することで高いデータ収集率を得る手法を提案している [7]。これらはノードの動作頻度等が制限されることにより低電池残量時の電力消費を抑えられているものの、代わりに周期的なデータの取得が行えない。

2.2 太陽光と風力発電を併用したハイブリッド発電

太陽光発電と風力発電を併用するハイブリッド発電の出力調整による電力損失低減 [8] [9] や風力発電機を用いた無線センサネットワークの運用 [10] について、中規模フィールドシステム等の電力規模が大きいシステムを対象とした手法が多く、センサ杭のような小規模電力システムには用いられていない。

2.3 先行研究

内田ら [2] はセンサ杭のデータ送信頻度を降雨量によって動的に変動させることで省電力化を行った AHEAD を実装し、センサ杭から送られたデータを可視化する web アプリケーションの logpot の実装を行なっている。特にデータ送信頻度の変動化による消費電力量の評価実験を行っており、1 分ごとの定周期稼働と周期変動させた AHEAD の消費電力量はそれぞれ 3.424[kWh] と 2.519[kWh] と 26.9% の消費電力削減を示しており、センサ杭の消費電力量と省電力化の有効性について示している。

林ら [11] は今まで、目立たず、かつ低コストで細やかに地下空間での氾濫を検知することを目指し、排水溝内での氾濫検知に静電容量方式の水位センサの適用を提案してきた。防水非接触型水検知無線センサノードを開発し、ノードに設置された銅テープ正面空間の静電容量が、水面との距離やその他の条件によってどのように変化するかを評価実験により確かめ、実験環境においてセンサから 8.80cm 以内の水面の距離を計測することが可能であるという結果を得たが、本研究で取り扱うセンサ杭の想定である河川越水のような大規模かつ急激な越水検知には測定距離の関係から不向きである。

3. システム概要

HyPoS が対象とするセンサ杭とは、杭設置箇所の周辺環境情報を収集するセンサ類を杭に内蔵し、土壌の崩壊や変状発生を無線通信等によって利用者に知らせるシステムであり、河川堤防や山間部、工事現場などに設置される。特に本研究では実際にセンサ杭として使用されている杭の寸法に近い 90 × 90 × 900 (mm) の杭を用いて実装を行う。

3.1 設計思想

HyPoS のセンサ杭バッテリーに対する充電には環境発電

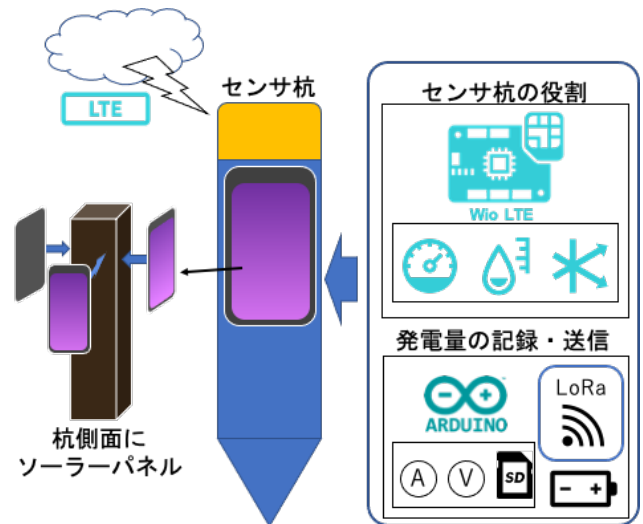


図 1 センサ杭のシステム簡略図



図 2 予備給電機のシステム簡略図

の太陽光発電を使用しており、ソーラーセルをセンサ杭の各側面に取り付けることにより持ち運び等による設置コストを抑えている。バッテリーの管理には小型マイコンを用いてソーラーセルの発電量の計測・記録を行い、また定期的に LoRa 通信にてバッテリー充電率を予備給電機に送信する機能も実装する。

また、HyPoS で扱うセンサ杭の仕様は、土壌水分量、越水時の水位、杭の傾きの情報を取得し、一定周期毎に LTE 回線を通じてデータベースに送信を行う仕様となっている。これらの簡略図を図 1 に示す。

予備給電システムは、センサ杭ほどの大きさの小型風力発電機によりバッテリーの充電を行い、小型マイコンにてバッテリーの充電管理と、受信したセンサ杭の充電率から放電推移の予測、充電率低下が見込まれる場合にセンサ杭に対して予備給電を行う。その簡略図を図 2 に示す。

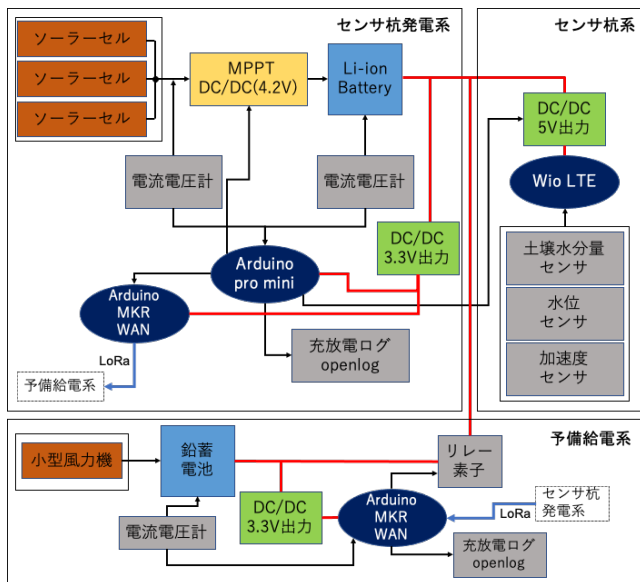


図 3 センサ杭及び HyPoS のシステム構成図

3.2 システム構成

HyPoS は太陽光発電を用いるセンサ杭に取り付け可能な発電及びバッテリー管理を行うシステム系と、風力発電を用いて電力不足時にセンサ杭に対して予備給電を行うシステム系に分けて構成される。また土中水分と水位、杭の傾きの情報を扱うセンサ杭システム系を HyPoS の給電対象として構成する。

上記 3 つのシステム系をそれぞれセンサ杭発電系、予備給電系、センサ杭系としてまとめ、この構成図を図 3 に示す。

4. 構成

4.1 センサ杭系

HyPoS の給電対象であるセンサ杭系は制御用マイコンに Wio LTE を使用し、センサ類は土壤水分量測定に DFRobot 社の土壤水分量センサ SEN0193、水位測定に LPS35HW、杭の傾き測定に 9 軸センサの MPU-9150 を用いている。水位測定に LPS35HW は気圧・水圧を計測するため、河川越水時に水と接触するセンサ杭の地上露出部と、越水時にも水と接触しない杭上部の箱内の 2 箇所に取り付けており、越水時には水圧と大気圧の圧力差から水位の測定を行っている。また、土壤水分量センサは杭の深度に分けた 2 箇所、9 軸センサは杭上部の箱内に取り付けている。Wio LTE の駆動には 5V 電圧が必要のため、センサ杭発電系のリポバッテリーから DCDC コンバータで電圧変換を行っている。

データの送信には LTE 回線及び軽量な配信プロトコルである MQTT を使い、送信間隔は 1 分 30 秒毎の定周期で行なっている。Wio LTE では SORACOM の SIM を使用しており、送信の際は MQTT で SORACOM サーバに送信

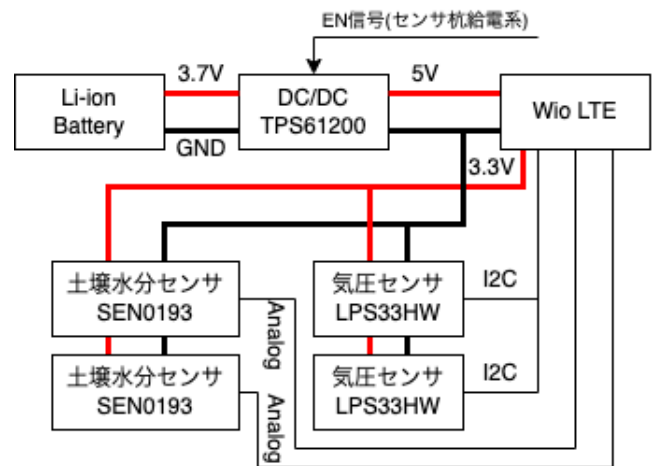


図 4 センサ杭系のブロック図

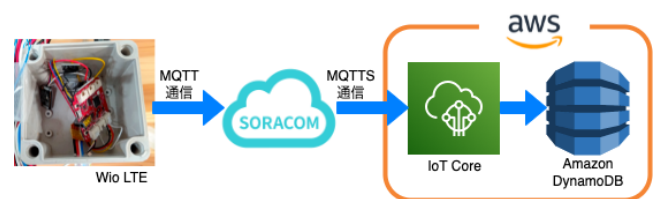


図 5 データ送信プロセス

し、SORACOM サーバは受信した情報を MQTTS で AWS に送信している。また AWS では IoT Core を使用しており、受信した情報を受信時刻とともに Amazon DynamoDB に登録される。

センサ杭系のブロック図及びデータ送信のプロセスをそれぞれ図 4, 5 に示す。

4.2 センサ杭発電系

HyPoS の構成の 1 つであるセンサ杭発電系は、5000mAh のリチウムイオンバッテリーを内蔵しており、センサ杭には 3 枚の 1W タイプのソーラーセルを杭の側面に取り付け、逆流防止にダイオードを挟みそれぞれ並列に接続している。このソーラーセルから取り出した電力にて、太陽光発電において効率よく電力を取り出す最大電力点制御機能 (以降、MPPT) を持つ DCDC コンバータ IC の LTC3119 を使用し、センサ杭発電系に内蔵されたバッテリーへ充電を行なっている。また、発電量及び放電量の測定とその記録を行うデータロガーの役割を持っており、後述する実測実験ではこのロガー機能を用いてセンサ杭発電系のデータ取得を行う。

制御用マイコンに Arduino pro mini を使用し、ソーラーセルの発電量測定及びバッテリーの充放電測定に INA226、データログの保存に microSD カードへの記録が可能な openlog を使用している。発電量測定の INA226 では発電系で流れる電流と印加されている電圧を 10 秒間隔で測定しており、電圧値と電流値から電力の値を求め、測定間隔の

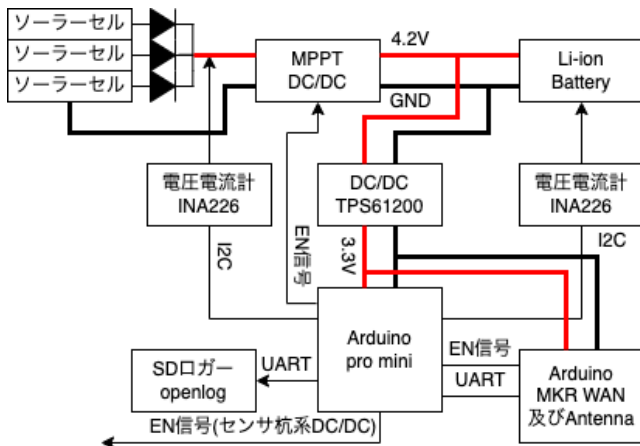


図 6 センサ杭発電系のブロック図

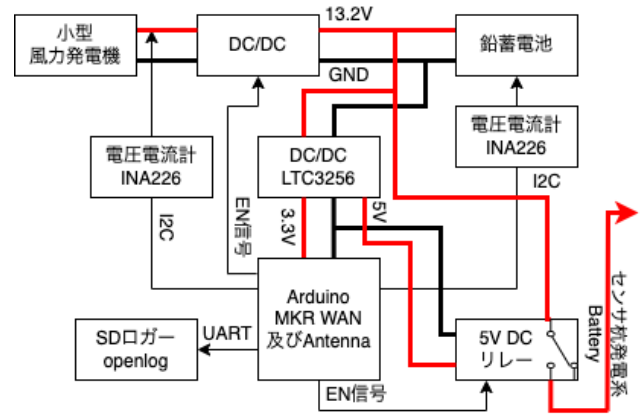


図 7 予備給電系のブロック図

時間で積算することで発電電力量を求めている。求めた値は取得した電圧・電流値とともにSDカードへ記録される。

バッテリーの充放電管理として、制御用マイコンは各DCDCコンバータへのイネーブル信号を持ち、過充電時にはソーラーセル側、過放電時にはセンサ杭側のDCDCコンバータの動作を停止させることでバッテリーの保護を行なっている。またソーラーセル側のDCDCコンバータを停止させた場合はバッテリーへ充電されなくなり、センサ杭側のDCDCコンバータを停止させた場合はセンサ杭系の動作が停止する。

予備給電系に対しては、30分毎にLoRaモジュールのArduino MKR WANを起動し、バッテリーの充電率を送信する。なお通信には長距離低電力の無線通信が可能なLoRa変調[12]を用いている。

これらセンサ杭発電系のブロック図を図6に示す。

4.3 予備給電系

HyPoSの構成の1つである予備給電系は、予備給電を行うためのバッテリーとして12V3Ahの鉛蓄電池を内蔵しており、風力発電機であるNorthPower社のマイクロミニ風力発電機KazeKozo[13]にて充電を行なっている。また、充電管理及び各センサ杭の充電率予測・予備給電処理を行う制御用マイコンはArduino MKR WANを使用しており、センサ杭発電系と同様に、発電量測定及びバッテリーの充放電測定にINA226、データログの保存にopenlogを使用している。発電電力量の算出もセンサ杭発電系と同様の方法で行なっており、得られた値は取得した電圧・電流値とともにSDカードへ記録される。

充電率予測ではセンサ杭発電系からLoRaにて定期的に送信されるセンサ杭の充電率情報を取得し、その受信間隔と取得した充電率から以降の充電率の推移の線形予測を行なっている。予測よりセンサ杭の次の送信タイミングまでにセンサ杭内のバッテリー充電率が大きく低下すると見込まれる場合、本予備給電系の内蔵バッテリーから該当センサ

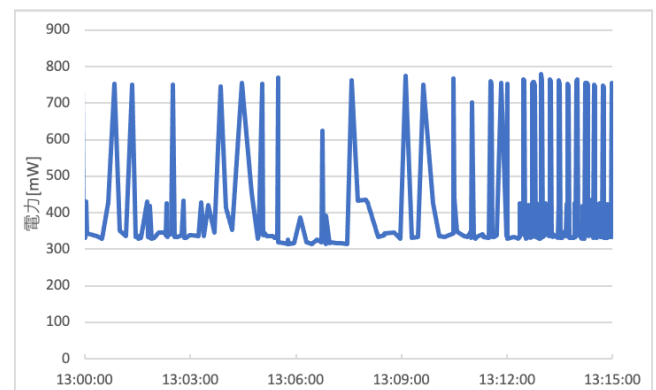


図 8 センサ杭系の消費電力

杭に対して給電を行う。特に本研究では、バッテリー充電率5%を給電判断の閾値とし、予測がこの閾値を下回り給電を始めた際は充電率10%以上に充電されるまで給電を行う。予備給電のスイッチングには5V駆動のリレー素子を用いており、マイコンはリレー素子へのイネーブル信号にて給電のON/OFFを制御し、また給電を受けたセンサ杭発電系はMPPC動作をオフにしたLTC3119にて電圧変換を行い、センサ杭内蔵バッテリーを充電する。

これらの予備給電系のブロック図を図7に示す。

5. 発電評価実験

5.1 センサ杭系の使用電力の計測実験

実験概要

はじめにHyPoSの給電対象であるセンサ杭系の消費電力量を計測するため、センサ杭系及びHyPoSのセンサ杭発電系による計測実験を行なった。また、本実験を室内で実施することでソーラーセルの発電によるバッテリー消費量の変動を抑えている。

結果

実験より得られたセンサ杭系の消費電力を図8に示す。

これより、本稿で用いているセンサ杭系の一日の消費電力量が9.527[Wh]であることが分かった。この結果を用いて、後述するHyPoSの発電性能と比較を行う。

表 1 センサ杭系の単位時間毎の消費電力量

	消費電力量
1 周期	9.924[mWh]
1 時間	0.397[mWh]
24 時間	9.527[Wh]

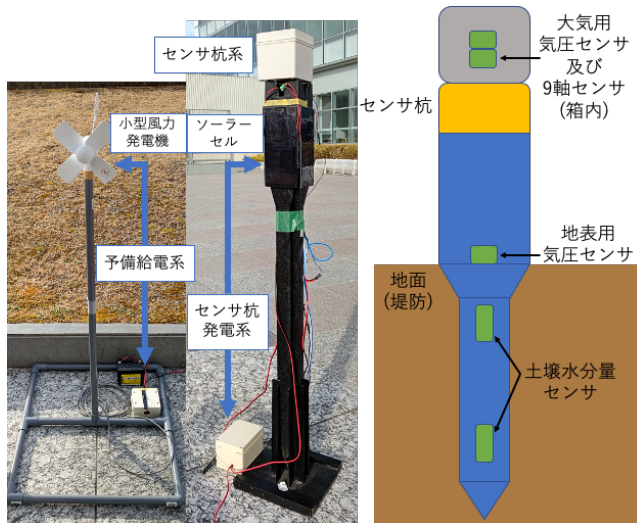


図 9 現行のセンサー杭外観

表 2 実験時の各日の合計全天日射量とセンサー杭発電系の発電電力

日付	合計全天日射量 [MJ/m ²]	発電電力量 [Wh]
1 月 22 日	13.39	16.15
1 月 23 日	6.82	8.87
1 月 24 日	10.24	9.98
1 月 25 日	11.84	12.47
1 月 26 日	6.77	6.07
1 月 27 日	12.77	13.71
1 月 28 日	9.78	9.51

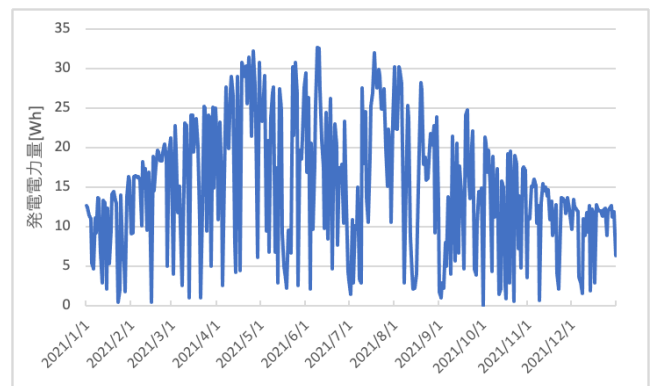


図 10 近似関数を用いた 2021 年の日毎の予測発電電力量

5.2 センサ杭発電系の発電評価実験

実験概要

HyPoS のセンサー杭発電系の発電性能を示すため、2022 年 1 月 22 日～1 月 28 日の期間、発電電力量の測定を行なった。なお本実験は、センサー杭が 1 日を通して周囲の建築物の影にならない場所として、東京電機大学 5 号館 6 階ルーフガーデンにて実施している。また国土交通省気象庁 [14] より取得した、実験期間中の 1 日合計全天日射量 6.77～13.39[MJ/m²] より、全天日射量に対するセンサー杭発電系の発電電力量を求める。実験時の HyPoS 含むセンサー杭及び HyPoS の予備給電システム外観を図 9 に示す。

結果

実験より得られた各日の HyPoS センサ杭発電系の発電電力量及びその合計全天日射量を表 2 に示す。また、全天日射量 H [MJ/m²]、センサー杭発電系の発電電力量を W [Wh] としたときの線形近似関数が式 1 となる。

$$W = 1.179H - 1.096 \quad (1)$$

この式 1 より、2021 年の日毎の全天日射量 [14] から 2021 年の日毎の発電電力量を算出したグラフを図 10 示す。

5.3 予備給電系の発電評価実験

実験概要

HyPoS の予備給電系の発電性能を示すため、晴天の日に 9:00～18:00 に 3 つのシステム系を接続した状態で実験を行なった。実験は先述したセンサー杭発電系の発電評価実験時と同じ、東京電機大学 5 号館 6 階ルーフガーデンにて実施し、また実施日の平均風速は 7.5[m/s] で、使用風力発電

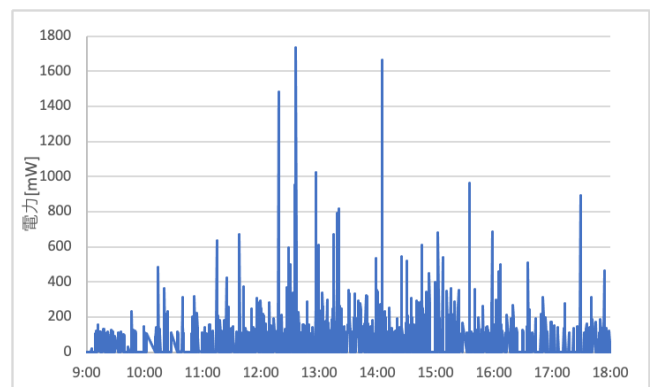


図 11 予備給電系の発電電力

表 3 予備給電系の発電電力量

発電電力量	時間 [h]	電力量 [mWh]
	9	470.9

機の仕様上およそ 4[Wh] の発電電力量が予想された。

結果

実験より得られた予備給電系の小型風力発電機の発電電力の推移を図 11、発電電力量の合計を表 3 に示す。

この結果より、電力量として合計すると 9 時間で 470.9[mWh] 発電されたため、小型風力発電機の 1 日あたりの発電電力量はおよそ 1.255[Wh] であると考えられる。

6. 予備給電の評価実験

6.1 実験概要

HyPoS の予備給電系でセンサー杭バッテリーの充電率を予測し、大きく低下する際に予備給電が行えることを示すた

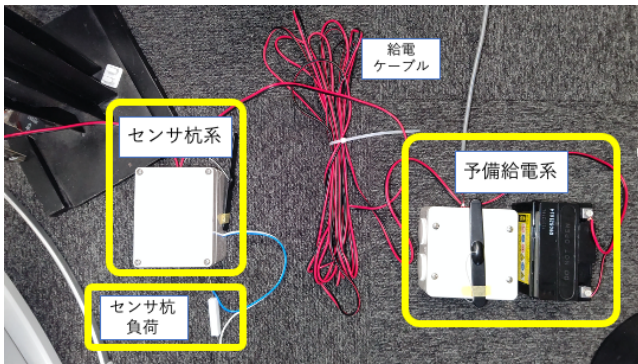


図 12 実験時の外観

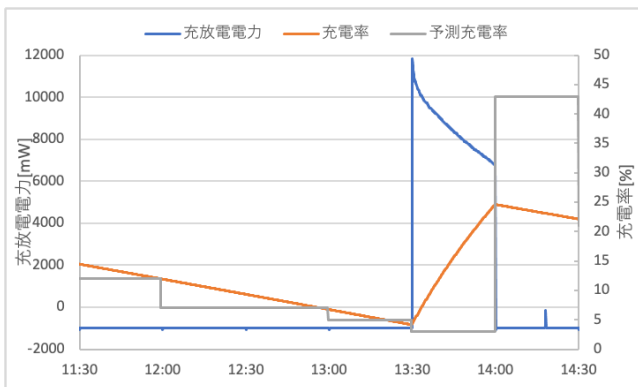


図 13 予備給電時の充放電電力及び充電率

め、センサ杭バッテリー消費実験を行なった。センサ杭発電系には、センサ杭系より大きい負荷となるセメント抵抗 $30\ \Omega$ を接続し、また室内で実施することでソーラーセルによる発電を抑えている。実験時の外観を図 12 に示す。

6.2 結果

実験より、センサ杭発電系の充放電電力及び内蔵バッテリー充電率の推移と、予備給電系にて予測されたセンサ杭内蔵バッテリーの充電率を図 13 に示す。なお、充放電電力が正の値の時はバッテリーが充電されており、負の値の時はバッテリーは放電をしている。

予備給電系による予測充電率はセンサ杭発電系から充電率を受信した時に予測されるため、受信していない間は一定値となっている。また、センサ杭発電系は接続された $30\ \Omega$ 負荷に給電しているため、内蔵バッテリーはおよそ 970[mW] の電力を放電している。

13:30 頃に予備給電系の予測する充電率が 5% を切ると、同時に充放電電力の値が大きく上昇し、予備給電系から給電が開始されたことが分かる。また、その 30 分後にセンサ杭測定系から充電率 24% が送信され、予備給電系は 10% 以上まで充電されたとして給電を停止している。この結果より、予備給電系はセンサ杭内蔵のバッテリー充電率 5% 以下を予測した時、センサ杭に対して予備給電を行えることが確認された。

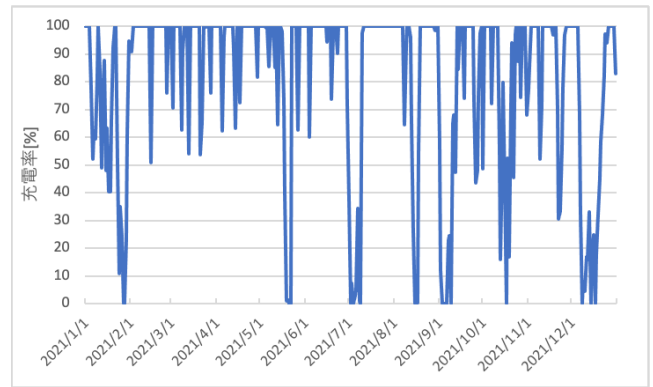


図 14 センサ杭系及び HyPoS センサ杭発電系のための 2021 年の日毎の予測充電率

7. 考察及び展望

7.1 考察

センサ系の計測実験にて得られた 1 日あたりの消費電力量 9.527[Wh] 及び、HyPoS センサ杭発電系の発電実験にて得られた全天日射量に対する発電電力量を求める式 1 より、センサ杭単体で合計全天日射量 $9.01\text{[MJ/m}^2\text{]}$ 以上の日にセンサ杭系の駆動が可能であると分かる。

また、前日のバッテリー充電率を繰り越した場合の 2021 年のセンサ杭内蔵バッテリーの充電率推移予測を図 14 に示す。

図 14 より、2021 年の場合、センサ杭発電系のための発電で 1 年のうち 273 日間センサ杭系を駆動することが可能であると予測される。したがって、充電率が 0% となる 92 日はセンサ杭系への給電が停止しないよう予備給電系からの予備給電が望まれる。

HyPoS の予備給電系の発電実験にて得られた 1 日あたりの予備給電系の発電電力量 1.255[Wh] について、実験実施日の平均風速 7.5[m/s] に対する予想発電電力量 4[Wh] より低い結果となった。実施日の主な風向きは北西であり、予備給電系の北面側が建築物に面していたため、予想された発電量より低くなったと考えられる。

7.2 展望

HyPoS のセンサ杭発電系について、長期的かつ様々な天候下で発電実験を行う必要がある。特に全天日射量が $20\text{[MJ/m}^2\text{]}$ を超えるような日のセンサ杭発電系の発電量を計測することで、より高い精度での発電電力量のシミュレーションを可能となる。

HyPoS 予備給電系についても同様に、より精度の高い発電性能の評価を行うため、長期的な発電実験を行う必要がある。その実測値より、風速に対する予備給電系の発電電力量の相関を導出し、センサ杭単体でのバッテリー充電率推移との比較、検証を行うことで HyPoS の予備給電性能の向上を目指す。また、予備給電系では 1 台で複数のセンサ杭に予備給電を行える冗長性を持たせられるよう、風力発

電機の再選定なども検討される。

8. 終わりに

本研究では多方面太陽光発電を用いたセンサ杭に搭載可能な持続的センサ杭給電システム及び悪天候等による充電能力低下時に備えた LoRa 通信を用いた充電率予測式の予備給電システムを併用したハイブリッド発電型センサ杭給電システムの HyPoS を提案した。また、給電対象であるセンサ杭の実装及び使用電力量を確かめ、HyPoS の発電性能、給電動作の評価実験を行なった。

これらの結果であるセンサ杭の消費電力と HyPoS の発電性能を比較することで、2021 年の場合、センサ杭単体で 273 日間のセンサ杭の駆動が可能であり、また残りの 92 日は予備給電システムから給電を受ける必要があると示された。

今後は、HyPoS の発電実験をより長期的かつ様々な天候下で実施し、センサ杭連続稼働日数等のシミュレーションを行う。シミュレーションより、年間でのセンサ杭の発電量及び必要となる予備給電の電力量を明らかにし、ソーラーセル等の再選定などを行いつつより実運用に適した発電系を構築する。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費基盤研究 (C)19K11949「直接クラウド通信機能を有するセンサ杭開発による持続可能な土砂崩落検知の実現」の支援を受けている。

参考文献

- [1] 株式会社リプロ：無線センサ端末を杭に内蔵した斜面監視システム!，株式会社リプロ（オンライン），入手先〈<https://ripro.co.jp/Tokyo-001/Download-07.pdf>〉（参照 2020）。
- [2] 内田響太，浜村純，野中直樹，高橋洗人，岡田謙吾，岩井将行：3G 通信網のリアルタイムデータ通信を可能にする周期変動型センサ杭システム，信学技報，vol.118，no.428，ASN2018-83，pp. 27-32 (2019)。
- [3] 株式会社リプロ：簡易斜面変位監視システム，株式会社リプロ（オンライン），入手先〈<https://www.i-ripro.com/info-dissem-pile/slope-monitoring.html>〉（参照 2020）。
- [4] 立野倫太郎，岩井将行ほか：山間部での斜面監視を行うセンサ杭搭載型多方面ソーラー給電システムの提案，研究報告ユビキタスコンピューティングシステム (UBI)，Vol. 2020，No. 26，pp. 1-2 (2020)。
- [5] 桑田司，立野倫太郎，成尾一征，山本昭，岡田謙吾，岩井将行ほか：河川越水を検知するリアルタイム水位検知杭の提案，研究報告ユビキタスコンピューティングシステム (UBI)，Vol. 2021，No. 2，pp. 1-5 (2021)。
- [6] 西川龍之介，中村玲，塚田晃司ほか：日射量の少ない山間部のネットワークでの電池残量を用いた経路制御法の提案，第 81 回全国大会講演論文集，Vol. 2019，No. 1，pp. 97-98 (2019)。
- [7] 石谷直也，小林健太郎，岡田啓，片山正昭ほか：太陽光発電を適用した無線センサネットワークにおける低発電量下でのデータ収集率向上のためのセンシング頻度の制限手法，研究報告マルチメディア通信と分散処理 (DPS)，Vol. 2014，No. 22，pp. 1-6 (2014)。
- [8] Saidi, A. and Chellali, B.: Simulation and control

of Solar Wind hybrid renewable power system, 2017 6th International Conference on Systems and Control (ICSC), IEEE, pp. 51-56 (2017).

- [9] Habibzadeh, M., Hassanalieragh, M., Soyata, T. and Sharma, G.: Solar/wind hybrid energy harvesting for supercapacitor-based embedded systems, 2017 IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), IEEE, pp. 329-332 (2017).
- [10] Kosunalp, S.: An energy prediction algorithm for wind-powered wireless sensor networks with energy harvesting, Energy, Vol. 139, pp. 1275-1280 (2017).
- [11] 林晃輔，近藤亮磨，小林亘，岩井将行：排水溝内での内水氾濫検知に向けた静電容量センサの評価，FIT2017 (第 16 回情報科学技術フォーラム)，Vol. 4，pp. 337-341 (2017)。
- [12] Corporation, S.: LoRa PHY — Semtech, Semtech Corporation (online), available from 〈<https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>〉 (accessed 2021)。
- [13] 株式会社ノースパワー：自然エネルギーのノースパワー風力発電機 KazeKozo, 株式会社ノースパワー（オンライン），入手先〈<http://www.northpower.co.jp/windturbine/kazekozo.htm>〉（参照 2020）。
- [14] 気象庁：気象庁 | 各種データ・資料，気象庁（オンライン），入手先〈<https://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>〉（参照 2022-1-29）。