

# 奥日光観光案内のための BLE ビーコンの設計と評価

伊 藤 篤<sup>\*</sup>  
平 松 裕 子<sup>\*\*</sup>

1. はじめに
2. 現在提供しているアプリの概要
3. 関連研究
4. BLE ビーコン
5. BLE ビーコンの動作状況
6. ビーコンネットワークの設計指針
7. ま と め

## 1. はじめに

国連世界観光機関（UNWTO）が発行した“COVID-19 and Transforming Tourism”<sup>1)</sup>によれば、2020年にはワールドワイドでは観光客数が58%から78%減少し、観光客の消費額は2019年の1.5兆ドルから2020年には3,100~5,700億ドルに減少するだけでなく、1億人以上の観光関連の直接雇用が危険にさらされるとしている。その中では、自然の豊かな地域も含め、地域に少人数での観光が推奨されているとともに、観光エコシステムのデジタル化が推奨されている。また、日本では、小泉環境大臣（当時）が、三密を避けながら自然を楽しむ、Go To 国立公園を提唱した<sup>2)</sup>。

COVID-19収束の後、独立行政法人国際観光振興機構が実施した調査の報告書によれば<sup>3)</sup>、[2022年10月より日本政府が個人旅行の受入れや査証免除措置の再開等を実施したことを受け、12月の訪日外客数は137万人と、前月の93万4,500人から約1.5倍となった。東アジア地域においては韓国からの訪日外客数が前月から大幅に増加したこと、また、その他の地域においてもタイや米

---

1) COVID-19 AND TRANSFORMING TOURISM, <https://www.unwto.org/news/un-policy-brief-on-tourism-and-covid-19> [Accessed 2023-3-20]

2) Go To National Park, Interview of Mr. Koizumi, Minister of the Ministry of the Environment (2020.9.29) <https://www.env.go.jp/annai/kaiken/r2/0929.html> [Accessed 2023-3-20]

3) 訪日外客数（2022年12月および年間推計値）、独立行政法人 国際観光振興機構、2023.1 [https://www.jnto.go.jp/jpn/news/press\\_releases/20230118\\_monthly.pdf](https://www.jnto.go.jp/jpn/news/press_releases/20230118_monthly.pdf) [Accessed 2023-3-20]

国等からの訪日外客数が回復基調にあることが今月の訪日外客数の押し上げ要因となった。なお、航空便においては増便の傾向が見られるが、新型コロナウイルス感染症拡大以前との比較では回復途上にある」。

また近年、健康の維持・促進・回復を主なテーマとした「ヘルスツーリズム」が注目されている<sup>4),5),6)</sup>。UNWTOによれば、ヘルスツーリズムは、以下のように定義されている。

「観光（及び旅行）は、ウェルビーイングの創造や改善に貢献できる活動である。ヘルスツーリズムとは、個人のニーズを満たし、環境や社会の中で個人としてより良く機能する能力を高める医療やウェルネスに基づいた活動を通じて、身体的健康、精神的健康に貢献することを主な動機とした観光の一種。ヘルスツーリズムは、ウェルネスツーリズムとメディカルツーリズムの総称である。」

2018年には国による旅と健康という視点からサービスの品質を客観的に評価する「ヘルスツーリズム 認証制度」<sup>7)</sup>がスタートするほど意識が高まっている。ヘルスツーリズムとは、自然を利用して健康になることを目的とした旅行ビジネスの一形態である。ヘルスツーリズムには、ウォーキング・森林浴・温泉浴・水中運動・食事・健康相談という6つの類型がある。既にいくつかの自治体では、ヘルスツーリズム企画が積極的に行われている。世界遺産に触れ五感を刺激しながらウォーキングを行い、また温泉浴も利用可能な「熊野古道健康ウォーキング」や山形県上山温泉の旅館に宿泊して健康志向の料理方法の学習及び温泉浴とウォーキングを行う「クアオルトバランス膳・朝食ウォーキング」などが事例として挙げられる<sup>8)</sup>。

Global Wellness Tourism Economy-November 2018<sup>9)</sup>によれば、2017年において世界のツーリ

4) “ヘルスツーリズムの考察 概要 (Exploring Health Tourism)”, UNWTO 駐日事務所, <https://unwto-ap.org/wp-content/uploads/2022/04/5797a6154a4cdf049f454c3f61a1599f.pdf> [Accessed 2023-3-20]

5) “ヘルスツーリズムとは?”, ヘルスツーリズム研究所, <https://www.tourism.jp/project/hti/health-tourism/> [Accessed 2023-3-20]

6) “心身を癒すヘルスツーリズムの可能性”, 関口陽一, 独立行政法人経済産業研究所, [https://www.rieti.go.jp/users/sekiguchi-yoichi/nett\\_114.pdf](https://www.rieti.go.jp/users/sekiguchi-yoichi/nett_114.pdf) [Accessed 2023-3-20]

7) 平成28年度健康寿命延伸産業創出推進事業（地域におけるヘルスケアビジネス創出推進等）調査報告書 [https://www.meti.go.jp/policy/mono\\_info\\_service/healthcare/downloadfiles/H28\\_houkokusyo\\_tiiki.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/healthcare/downloadfiles/H28_houkokusyo_tiiki.pdf)

「ヘルスツーリズム認証」の事業化にむけた活動について [https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/shoujo/jisedai\\_healthcare/sinjigyo\\_wg/pdf/009\\_06\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/shoujo/jisedai_healthcare/sinjigyo_wg/pdf/009_06_00.pdf)

8) NTT docomo, “自治体に広がるヘルスツーリズムの現状と参考事例”, <https://www.d-healthcare.co.jp/business-column/jichitai20200109/>, 2020-01-09 [Accessed 2023-3-20]

表1 ヘルスツーリズムマーケット予測

Wellness Tourism Growth Projections, 2017-2022

	Projected Expenditures		Projected Average Annual Growth Rate
	2017	2022	2017-2022
North America	\$241.7	\$311.3	5.2%
Europe	\$210.8	\$275.0	5.5%
Asia-Pacific	\$136.7	\$251.6	13.0%
Latin America-Caribbean	\$34.8	\$54.7	6.5%
Middle East-North Africa	\$10.7	\$18.7	11.8%
Africa	\$4.8	\$8.1	11.1%
<b>Total Wellness Tourism Industry</b>	<b>\$639.4</b>	<b>\$919.4</b>	<b>7.5%</b>

出所：Global Wellness Institute estimates based upon tourism industry data from Euromanitor international, economic data from the IMF, and GWI's data and projection model

ズム市場は約6,390億ドルである(表1)。さらに、コロナ禍以前の予測ではあるが、2017年から2022年にかけて、アジアや中東地域を中心として9,194億ドルまで市場は拡大すると予測されている。

世界的に「ヘルスツーリズム」の需要は伸びており、日本にはヘルスツーリズムの資源となる観光地や施設が多く存在している。現在は新型コロナウイルスの影響によりインバウンドは逆風であるが、将来的に森林浴の効果を明らかにすることでヘルスツーリズムを始めとした観光市場への盛り上げに役立てることができると考える。そこで、これまで我々は日光・奥日光(日光国立公園)で、ビーコンを利用した観光支援アプリの開発を行ってきた<sup>10),11)</sup>。本稿では、2章で現在提供しているアプリの概要を、3章では関連研究について述べる。4章はBLEビーコンの概要を述べる。5章ではBLEビーコンの動作状況を説明し、6章では、これらから読み取れるBLEビーコンの設置場所について指針を提示する。そして、7章でまとめを行う。

9) Global Wellness Tourism Economy - November 2018, Global Wellness Institute Health Tourism Certification, <https://htq.npo-healthtourism.or.jp/> [Accessed 2023-3-20]

10) Sasaki, A.; Xiang, F.; Hayashi, R.; Hiramatsu, Y.; Ueda, K.; Harada, Y.; Hatano, H.; Hasegawa, H.; Ito, A., "A Study on the Development of Tourist Support System Using ICT and Psychological Effects," *Appl. Sci.* 2020, *10*, 8930. <https://doi.org/10.3390/app10248930>

11) Ito, A. *et al.* (2022). "Designing Sightseeing Support System in Oku-Nikko Using BLE Beacon." In: Moreno-Díaz, R., Pichler, F., Quesada-Arencibia, A. (eds.) *Computer Aided Systems Theory - EUROCAST 2022. EUROCAST 2022. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 13789. Springer, Cham, [https://doi.org/10.1007/978-3-031-25312-6\\_62](https://doi.org/10.1007/978-3-031-25312-6_62)

## 2. 現在提供しているアプリの概要

我々が開発している iPhone アプリ「奥日光ナビ」<sup>12)</sup>には、図1に示すように、「地図画面」、「図鑑」、「天気」、「ビーコン」、「設定」の5つの機能がある。

地図画面：戦場ヶ原周辺の地図に加え、ビーコンの設置場所、トイレやバス停の場所がわかるようになっていく。

図鑑：戦場ヶ原・小田代原で見ることのできる野鳥・花・山の情報を知ることができる。見たい項目をタップしていくことで詳細の対象が表示される。

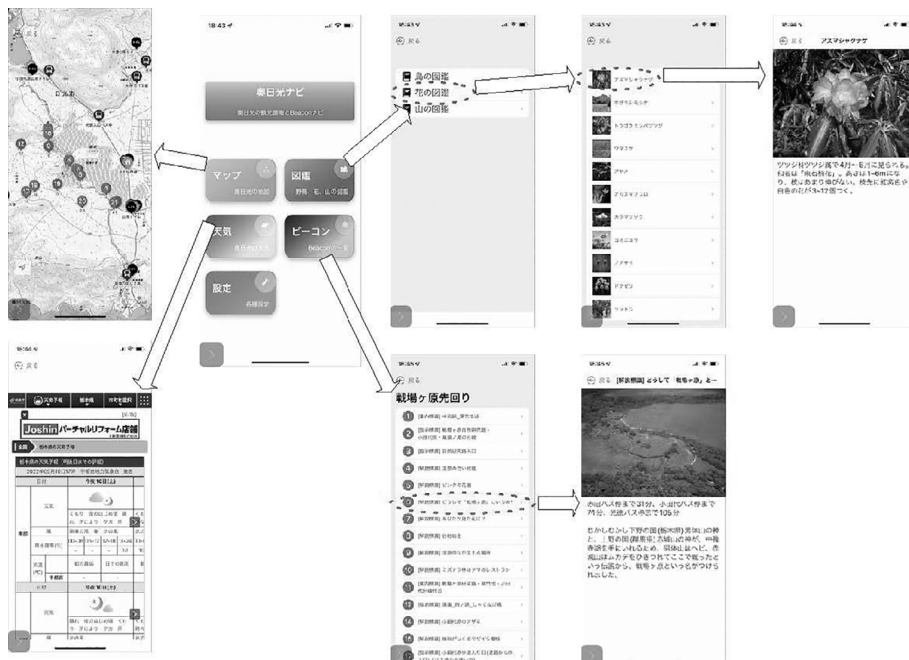
天気：気象庁のサイトに飛び、栃木県の1週間分の天気を知ることができる。

ビーコン：設置してあるビーコンの一覧が表示される。反応したビーコンは赤く表示され、タップすることで、ポップアップした内容をもう一度見ることができる。

設定：ビーコンの初期化を行う。将来的には言語の切り替え機能を入れる予定である。

現在、ビーコンは、図2に示す場所に設置してあり、一部の間隔が短いところを除けば、おお

図1 アプリの画面遷移



12) <https://apps.apple.com/jp/app/%E5%A5%A5%E6%97%A5%E5%85%89%E3%83%8A%E3%83%93/id1620149411>

図 2 ビーコン設置場所

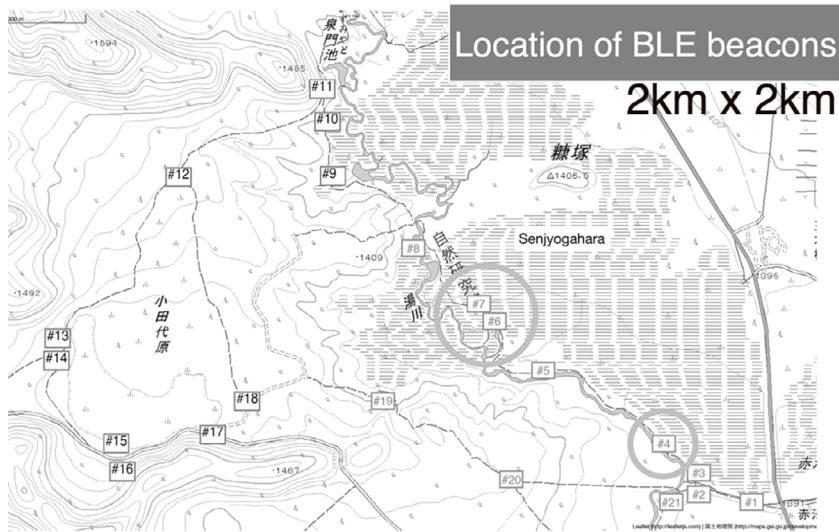


表 2 ビーコンと標識の対応

#1	案内標識 (中宮祠_湯元歩道)
#2	指導標識 (戦場ヶ原自然研究路・小田代原・竜頭ノ滝の分岐)
#4	解説標識 (白い絨毯)
#5	解説標識 (ピンクの花園)
#6	解説標識 (戦場ヶ原の由来): デッキ 1
#7	解説標識 (あなたが見た花は?): デッキ 2
#8	解説標識 (谷地坊主)
#9	解説標識 (湿原の花が生える場所)
#10	解説標識 (ミズナラ林)
#11	案内標識 (戦場ヶ原研究路・泉門池・小田代の分岐)
#12	指導標識 (湯滝_西ノ湖_しゃくなげ橋分岐)
#14	解説標識 (小田代原のアザミ)
#15	解説標識 (植物がつくるモザイク模様)
#17	案内標識 (小田代原歩道入り口 (道路からの入口, 赤沼寄り))
#18	解説標識 (奥日光のカラマツ)
#19	指導標識 (戦場ヶ原展望台分岐)
#20	指導標識 (小田代ヶ原_しゃくなげ橋_赤沼分岐)
#21	指導標識 (しゃくなげ橋_赤沼_小田代ヶ原分岐)

(注) #3, #13, #16は, 試験用であり商用アプリでは使用していない。

よそ200~400m 間隔となっている。尚, 図中の数字は, ビーコンの通番である。また, 各ビーコンは, 戦場ヶ原, 小田代原の看板や標識に取り付けてあり, それらとの対応を表2に示す。現在, アプリの評価を行っており, そこで得られた知見に基づき, 休憩所のアイコンの追加, トイ

レや休憩所への距離・時間の表示機能の追加，図鑑の内容増強，戦場ヶ原の成り立ちや伝説など，機能や情報の追加・改良を行っている。

また，このアプリは，2023年3月現在，iPhone向けにiTunes Storeでの公開のみとなっているが，Android版の開発も進めており，2023年度2Qのリリースを予定している。

### 3. 関連研究

観光支援アプリに関する研究は多岐にわたる。以下に例を示す。

- ・広島県を対象に，観光地の半径100mに近づくとバーチャル宝物がもらえるスタンプラリー機能がある観光地紹介アプリケーション<sup>13)</sup>。
- ・名古屋のリニモ沿線地域の活性化を目的に地域情報発信アプリ「リニモ de AR」は，ARを活用し，カメラに写した駅のイベント情報や施設案内情報を提供する<sup>14)</sup>。
- ・高山市には，マップビューに表示されているピンをタップすると，ピンの半径50m内にいた場合コンテンツの情報が表示されるアプリもある<sup>15)</sup>。このアプリは，観光客の行動データを分析するためのプラットフォームとしての機能もある。
- ・名古屋市東区「文化のみち」を対象とした観光エリアからの一方向の情報発信だけでなく，観光客も情報を発信できるアプリケーションとして，利用者は目的のスポットのアイコンをタップすると今までの利用者が撮影した画像一覧を見ることができるようになる<sup>16)</sup>。また，ユーザーの現在地を中心とした地図上にマーカーを描画し，マーカーをタップすると写真撮影やクイズを行うことができるアプリもある<sup>17)</sup>。これは，GPSとスタンプラリー機能を利用し，観光スポットでの現地体験の促進を目的とする。

---

13) Takumi, I.; Shin, K.; Kazuya, M.; Ayahiko, N. Sightseeing Spot Database Accumulated by Mobile Application. 2010, 12, 7434. <http://harp.lib.hiroshima-u.ac.jp/pu-hiroshima/metadata/7434>

14) Takaaki, H.; Masatada, T.; Tomohisa, A.; Hironori, F.; Kenichi, Y.; Yoshitaka, N.; Ayumi, W., A development of an information navigation tool for the iPhone anda project to revitalize the area along the Linimo Line. 2011, 3, 1487. <http://hdl.handle.net/11133/1487>

15) Hiroki, W.; Kenichi, S.; Hideki, T., Development of Technology for Measuring Tourist Behavior and Method for Providing Location-based Tourist Information (3<sup>rd</sup> report). 2013. [https://www.gitec.rd.pref.gifu.lg.jp/files/reports/2013/information\\_2013\\_01.pdf](https://www.gitec.rd.pref.gifu.lg.jp/files/reports/2013/information_2013_01.pdf)

16) Fukumi, K.; Satoki, N.; Mayu, U.; Takami, Y., Proposal and Development of Photo Rally System for Sightseeing. 2013, 9. [https://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo\\_10484005\\_po\\_ART0010387442.pdf?contentNo=1&alternativeNo=](https://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_10484005_po_ART0010387442.pdf?contentNo=1&alternativeNo=) [Accessed 2022-9-10]

17) Satoki, N.; Fukumi, K.; Mayu, U.; Takami, Y., "Development of sightseeing support system using smartphone", 2013. [https://jglobal.jst.go.jp/detail?JGLOBAL\\_ID=201302278377211149](https://jglobal.jst.go.jp/detail?JGLOBAL_ID=201302278377211149) [Accessed 2022-9-10]

BLE ビーコンを使用した関連研究もいくつかある。

- ・イスタンブールには、ファシリティマネジメントにおける効率的な意思決定を支援するシステムがある<sup>18)</sup>。ここでは、ビーコンは居住者の位置確認に使用された。
- ・バルセロナのカサ・バトリョでは室内の部屋にタブレットを向けると、当時の様子が再現されるサービスが存在する。ビーコンによる屋内追跡システムを活用することで、ユーザーが部屋に滞在する時間を収集しビデオガイドを改善している<sup>19)</sup>。

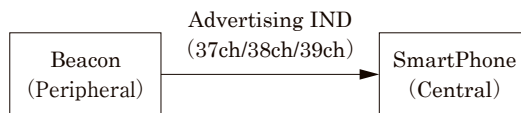
我々の研究は、BLE ビーコンを活用して、おおよその現在位置を知らせるとともに、ユーザーに様々な情報、特に、帰りのバス停までの距離や時間、バスの時刻などの安心安全にかかわる情報や自然に触れ合うための図鑑情報などを提供することで、初めて奥日光を訪れたひとでも、安全で快適な旅行を支援するという点が先行研究との異なる点である。

#### 4. BLE ビーコン

BLE (Bluetooth Low Energy) ビーコンは、BLE の Advertising 機能を利用して、位置情報を配信する装置である。BLE は、2.4GHz 帯の周波数を 2 MHz の幅で、0～39の番号が付けられた40個の帯域に分割して使うが、このうちの37, 38, 39の3つを Advertising という、ビーコンの ID などを周りの機器に知らせるために使っている (図3)。つまり、Peripheral であるビーコンの範囲内に Central が入ったときに自身の位置情報を Central に伝えることができる。

BLE ビーコンは、主に、屋内における位置測位に使われることが多いが<sup>20), 21)</sup>、我々は、これまで、屋外における観光情報配信に利用してきた。BLE ビーコンを使うことで、地図アプリで GPS

図3 BLE Advertising とチャンネルの対応



18) Deniz, A.; Esin, E.; Behlul, K.; Gursans, G., BIM Integrated Post-Occupancy Evaluation System for Office Buildings. 2022.3. [https://www.itcon.org/papers/2022\\_22-ITcon-Artan.pdf](https://www.itcon.org/papers/2022_22-ITcon-Artan.pdf) [Accessed 2022-9-10]

19) Seeing Gaudi's Casa Batlló through augmented reality, <https://www.idgconnect.com/article/3581215/seeing-gaudis-casa-batllo-through-augmented-reality.html> [Accessed 2022-9-10]

20) “屋内測位のための BLE ビーコン設置に関するガイドライン”, 国土交通省 国土地理院 測地部, <https://www.gsi.go.jp/common/000198740.pdf>, 2018年2月

21) “東大寺でクリーンビーコンを用いた観光ガイド実証実験を開始”, [https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_100667.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100667.html), 2016年11月

を使い続けるのと比較して、スマホの消費電力を抑えることができるため、特に戦場ヶ原のような、充電する場所が無い、人里離れたエリアでの利用に適している。

図4に、BLE ビーコンとそれと連動するスマホアプリの動作概要を示す。Advertisingを受信したスマートフォンのBLE受信機能はAdvertisingパケットの内容をアプリに通知する。アプリは、そこに含まれるIDを見て、それが自分が待ち受けているものであると認識できた場合に予め定められた処理を行う。たとえば、我々が作っているアプリであれば、図5に示すように、ポップアップを表示し、付近の写真や奥日光に関連する情報、そこから出口やバス停までの距離、時間を示すようになっている。

図4 BLE Advertising とアプリの動作

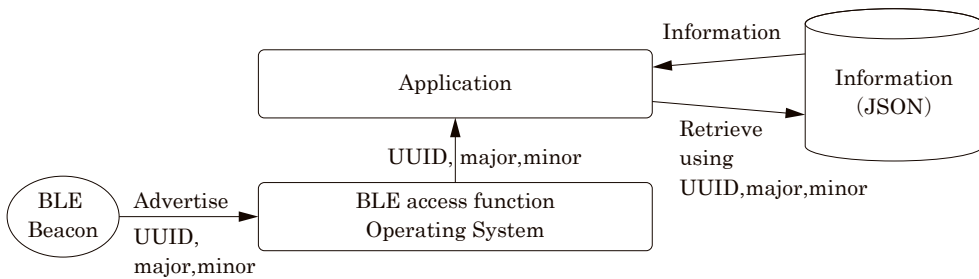
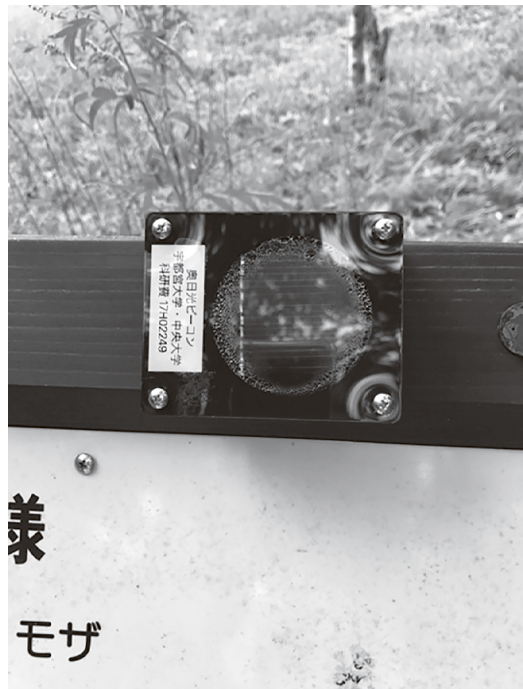


図5 ビーコン発見時のポップアップ（バス停までの時間と、付近の説明が表示される）



図6 太陽電池式ビーコン（第一世代）





2018年以降, 図6に示す, 太陽電池式のビーコンを作製し, 実験を行ってきた. このソーラービーコンの開発と設置の実験は, 主に, 観光客が少なくなる秋から初冬にかけて実施した. このときは順調に動作したことが確認できたが, 夏に, 充電不足による動作停止が発生した. この理由を調査したところ, 主に実験を行った秋から初冬にかけては, 木々の葉が落葉し, 日当たりが良い状態であるが, 夏になって木々の葉が茂ると, 戦場ヶ原の森の中に設置してあるソーラー BLE ビーコンは発電ができなくなっていた. 調査の結果, 図6に示したソーラーパネルはシリコンをベースとしており, 強い直射日光があつて初めて発電ができるものであつた. 図7に示すように, 約40万ルクスの照度があれば, 電池を充電しつつ BLE ビーコンを駆動するだけの発電が可能であるが, 最低でも約34万ルクスの照度がないと十分な発電ができないことが判明した. なお, ここで利用した太陽電池は, 以下の諸元のものである<sup>22)</sup>.

- 10×Polycrystalline solar cells.
- Rated output: 5V @ 40mA
- 55 mm diameter×3mm thick

図7 照度と太陽電池パネルの関係  
(左: ビーコン運用可能, 右: ビーコン運用不可能)



22) "Round Solar Panel Skill Badge", <https://www.adafruit.com/product/700> [Accessed 2023-3-20]

そこで、奥深い森の中でも、BLE ビーコンを駆動できるソーラーBLE ビーコンに利用可能な太陽電池を探したところ、最終的に、色素増感太陽電池 (DSSC)<sup>23)</sup>が所望の性能を持つことがわかり、これを採用した。

今回は、十分な発電量を確保するため、縦横56.0×112.0mm、厚み2.5mm、有効発電面積48.2cm<sup>2</sup>のものを採用した。

この太陽電池は、照明のない部屋や雨の日の夕方など暗い場所でも発電できるものである。BLE ビーコンの消費電力に関する研究<sup>24)</sup>によると、ビーコンを3Vで駆動し、0.5秒に1回だけ Advertising チャンネルを送信する場合の消費電力は約0.064mAhとなる。この太陽電池の充電回路には3.7V、40F コンデンサを搭載しており、これを資料<sup>25)</sup>を参考に電池容量に換算すると20mAhの電力を蓄積できることがわかる。このため満充電で20/0.064=312時間 (=13日間) 動作

図8 太陽電池とビーコンエネルギー収支

Illuminance (lx)	2 hr/d	4 hr/d	8 hr/d	12 hr/d	24 hr/d
100	■	■	■	■	■
200	■	■	■	■	■
300	■	■	■	■	■
400	■	■	■	■	■
500	■	■	■	■	■
600	■	■	■	■	■
700	■	■	■	■	■
800	■	■	■	■	■
900	■	■	■	■	■
1000	■	■	■	■	■
1500	■	■	■	■	■
2000	■	■	■	■	■
2500	■	■	■	■	■
3000	■	■	■	■	■
4000	■	■	■	■	■
5000	■	■	■	■	■
6000	■	■	■	■	■
Over 10000	■	■	■	■	■

■ (黒) 利用不可  
 ■ (薄いグレー) 利用可 + 充電不可  
 ■ (濃いグレー) 利用可 + 充電可

23) Dye Sensitized Solar Cell (DSSC), [https://www.fujikura.co.jp/newsrelease/products/2062444\\_11541.html](https://www.fujikura.co.jp/newsrelease/products/2062444_11541.html) [Accessed 2023-3-20]

24) "BLE/iBeacon 消費電力ハック", <https://qiita.com/ksksue@github/items/0811fd62bd970fa93337> [Accessed 2023-3-20]

25) Emerging Technologies for Sustainability: Proceedings of the Annual International Conference on Emerging Research Areas (AICERA 2019), Kottayam, Kerala (English Edition) (ed.) P.C Thomas Vishal John Mathai, Geevarghese Titus, July 18-20, 2019

することが期待できる。エネルギー収支計算シミュレーター<sup>26)</sup>を用いると、図8のように、1日の日照時間が2時間以上なく、ほとんど光がない状態であっても、ビーコンの動作が期待できることもわかった。

現在、実験に利用しているソーラービーコンを図9に示す。サイズは、125×80×25mmである。図10に、ビーコンの中身を示す。ビーコン、充電回路、リチウムイオンキャパシタから構成されている。

このビーコンは、2021年6月から、戦場ヶ原への設置許可を得て、実験に利用している。取り付け状況を図11-1、11-2に示す。太陽電池は弱い光でも発電が可能なため、ビーコンが雪に埋まった状態でも動作可能である。

図9 ソーラービーコン (現行モデル) (125×80×25mm)



図10 新しいソーラービーコン内部

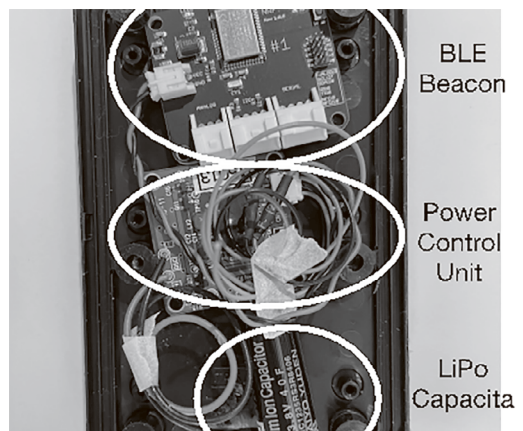


図11-1 設置したビーコン (木道)



図11-2 設置したビーコン (森林)



26) “エネルギー収支計算シミュレーター”, <https://dsc.fujikura.jp/energy-balance-calculation.html> (現在はアクセス不可)

なお、#3、#13、#16については、他のビーコンと近いため、現在はビーコンを設置していない。

## 5. BLE ビーコンの動作状況

次に、2021年8月～2023年2月までに、6回のBLEビーコン動作状況調査を行った結果を示す。具体的には、以下の6日である。

2021.08.28 (曇り) (Cl)

2021.09.04 (雨) (Ri)

2021.10.23 (曇り/雪) (Cl/Sn)

2022.02.23 (曇り/雪) (Cl/Sn)

2022.09.06 (曇り) (Cl)

2023.02.23 (曇り) (Cl)

利用した機材は、iPhone XR である。

また、測定した項目は以下の4項目である。

ビーコン反応距離 (歩数, おおよそ50cm)

RSSI 値 (スマホアプリ「nRF Connect」<sup>27)</sup>で測定, 単位: dBm)

発信間隔 (nRF Connect で測定, 単位: ミリ秒)

ビーコン付近の照度 (スマホアプリ「Galactica Luxmeter」<sup>28)</sup>で測定, 単位: Klux)

ビーコン反応距離:

観光案内アプリケーションにおいて、どれくらい遠くからビーコンに反応するのかというのは最も重要である。そこで、ビーコンに反応する距離を測定した。なお、山道であり、メジャーで測定するのは困難であるため、歩数を利用しておおよその距離を測定した。

なお、2021年8月28日は、距離を測定しなかったためデータが欠落している。

図12-1に、測定日と各ビーコンにおける反応距離を示している。

図12-2には、各測定日における平均反応距離を示す。12歩～19歩となっており、日によって反応距離の差がある。

図12-3には、ビーコン毎の反応距離を示している。

---

27) nRF Connect for Mobile, <https://apps.apple.com/jp/app/nrf-connect-for-mobile/id1054362403> [Accessed 2023-3-20]

28) Galactica Luxmeter, <https://apps.apple.com/us/app/galactica-luxmeter/id666846635> [Accessed 2023-3-20]

図12-1 測定日とビーコン毎の反応距離

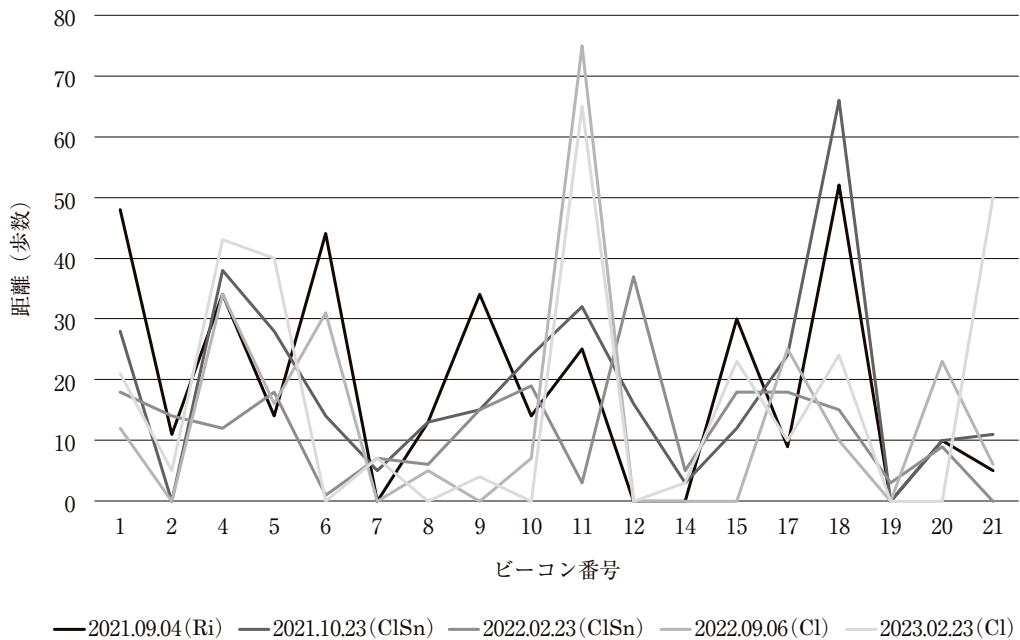
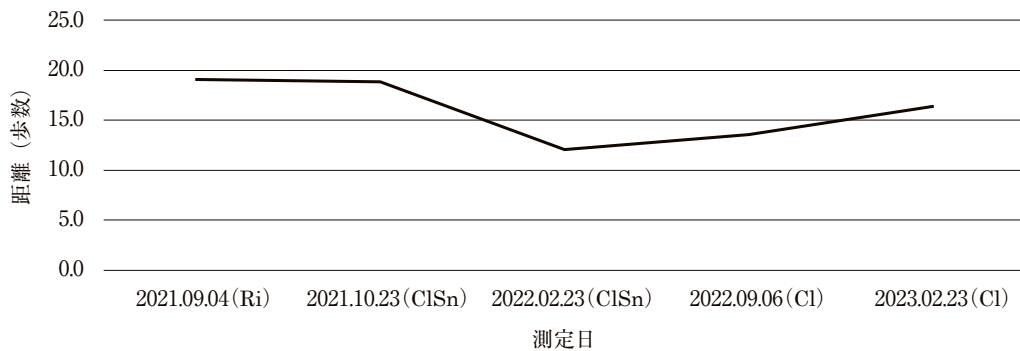


図12-2 測定日毎のビーコン反応距離の平均



これを見ると、ビーコン # 2, # 7, # 14, # 19 の場合のビーコン反応距離が 6 歩 (約 3 m) 以下となっており、かなり近づかないと反応していないことがわかる。

また、# 4, # 11, # 18 は、30 歩 (約 15 m) 程度の距離からも反応していることがわかる。

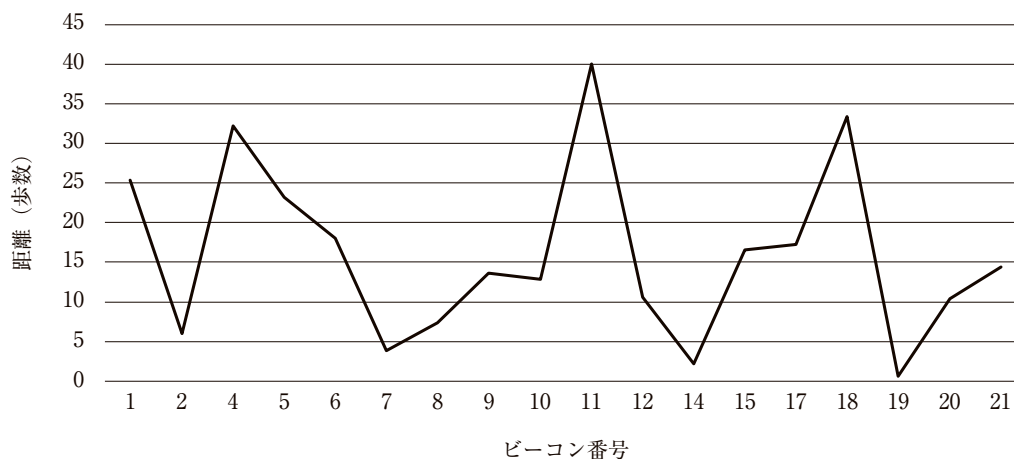
また、最大値としては、2022 年 9 月 6 日の # 11 が 75 歩 (約 38 m) を記録した。

平均で 30 歩 (15 m) 以上となっているのは、# 4, # 11, # 18 である。

# 4, # 18 は解説標識、# 11 は案内標識である。

設置している位置は、# 4, # 18 については地上 30 cm ~ 80 cm くらいのところにあり、本来であればあまり遠くまで電波が届かない状況であるが、周囲が木道であり、木道に反射した電波が遠

図12-3 ビーコン毎の反応距離の平均



くまで届いていると考えられる。

#11は、地上2.5mほどのところに設置されており、この高さの関係で、遠くまで直接電波が届いていると考えられる。周囲は土の地面であり、反射波はあまり期待できない。

このほか、案内標識である#1、#17も地上2mほどのところに設置されており、高さの効果でそれぞれ25歩、17歩と、安定した信号発信ができています。

次に、電波があまり届いていないケースを考察する。

5歩を切っているところとしては#7、#14、#19がある。

#14、#19は、日当たりが悪く、かつ、太陽電池の表面に汚れが溜まりやすい場所であり、電池の残量が少なくなったことがひとつの理由と考えられる。

#7は、#6から近く、連続してビーコンを受信できないという制約が影響していると考えられる。

RSSI 値（電波強度）：

図13-1に、各測定日の、各ビーコンの電波強度（RSSI）を示す。これを見ると、-58dbm から-101dbmまで、かなりのばらつきがあることがわかる。

図13-2には、測定日のRSSI値の平均を示す。これによれば-76dbmから-91dbmと、個別にはばらつきがあるものの、平均としては比較的安定した状態を示している。

図13-3には、各ビーコン毎のRSSI値を示す。この中で-90dbmを下回ったビーコンは#19、#20である。どちらも樹林帯、かつ尾根に囲まれた場所にあり、太陽光は冬場でも弱く、また、まわりの木々の影響で太陽電池が汚れやすい場所である。

また、図13-4に示すように、2022年9月6日と2023年2月23日の調査では、RSSI値が-90dbm

図13-1 測定日とビーコン毎の電波強度 (RSSI)

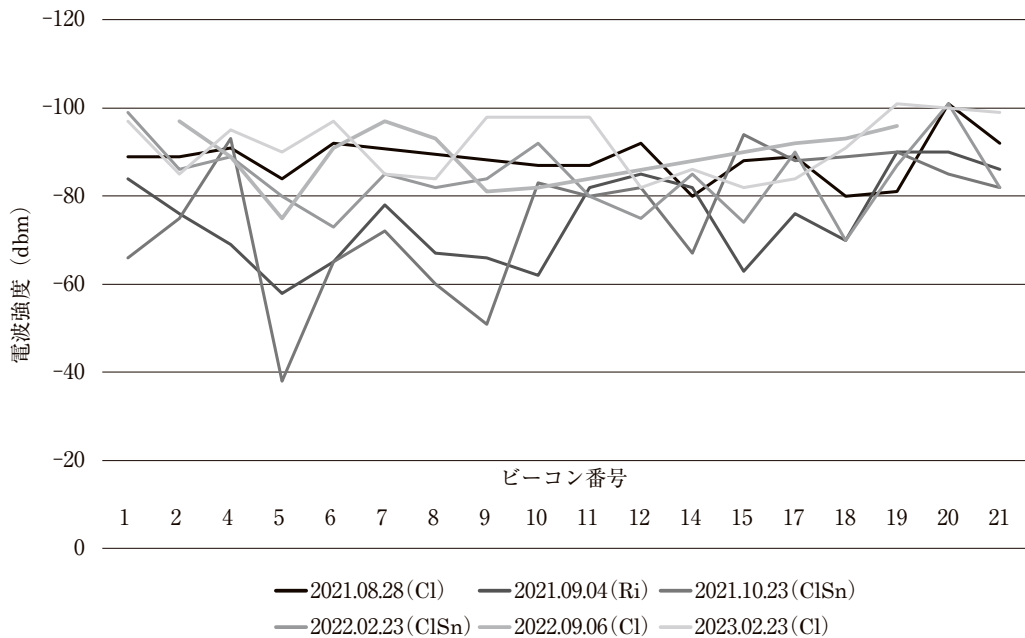
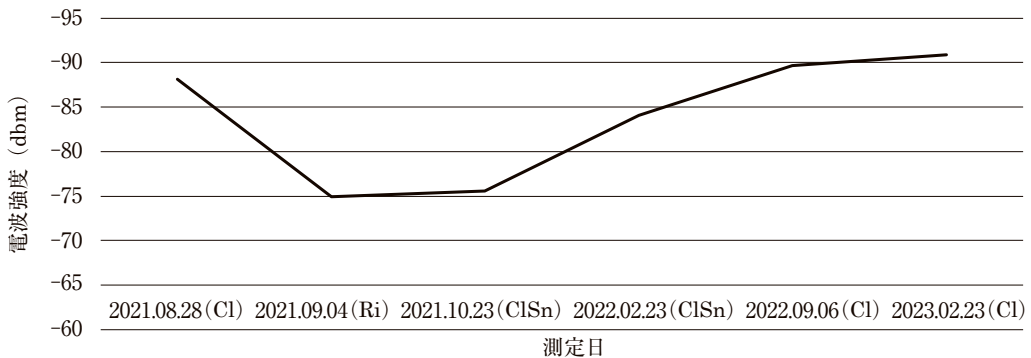


図13-2 測定日毎の電波強度の平均 (RSSI)



を下回るケースが、それぞれ全体の64%、56%となっており、半数以上の場所で RSSI 値がかなり低いことがわかる。

しかしながら、反応した歩数が一番小さかった2022年2月23日は、RSSI 値が-90dbm を下回る割合は22%であり、必ずしも、RSSI 値が低いからビーコンの動作に影響があるとは言えないと考えられる。

RSSI 値を箱ひげ図にしたものが図13-5である。これを見ると、測定が新しくなるに従って、RSSI 値が下がっていく様子が見られる。ひとつの理由としては、iOS のバージョンアップによ

図13-3 ビーコン毎の電波強度の平均 (RSSI)

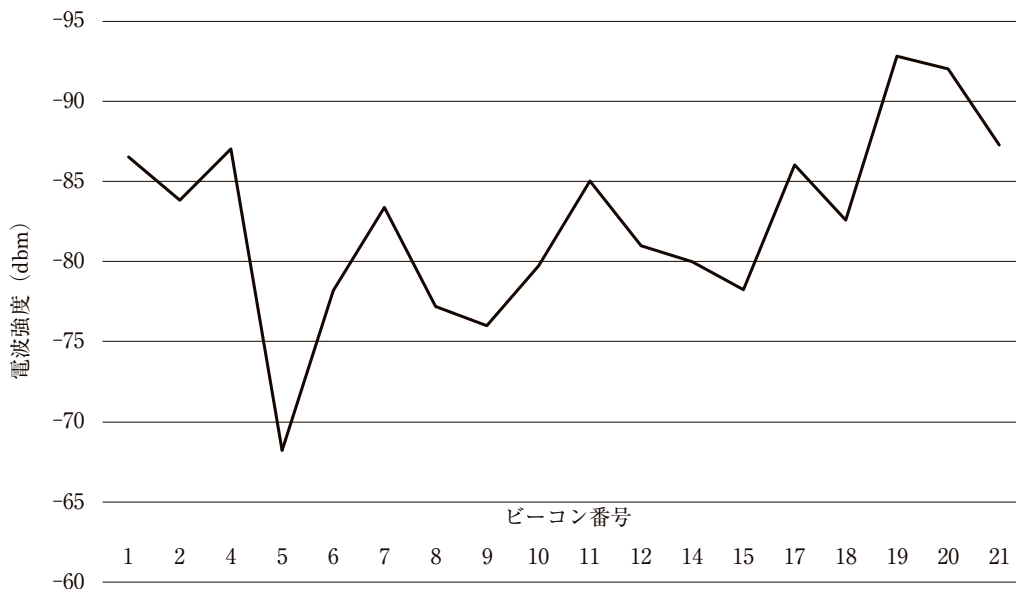
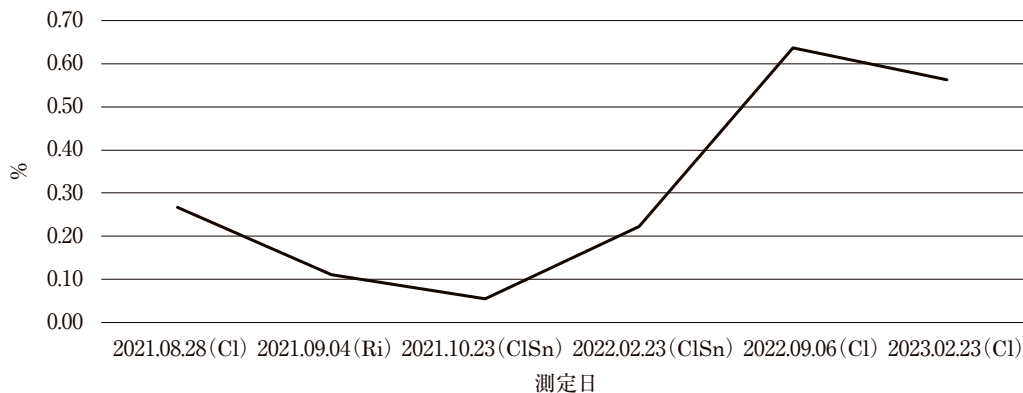


図13-4 測定日毎の電波強度の平均 (RSSI 値が -90 以下の割合)



り、BLE の電波が弱い場合でも受信ができるようになったため、受信時の RSSI 値が低めに出ていると考えられる。

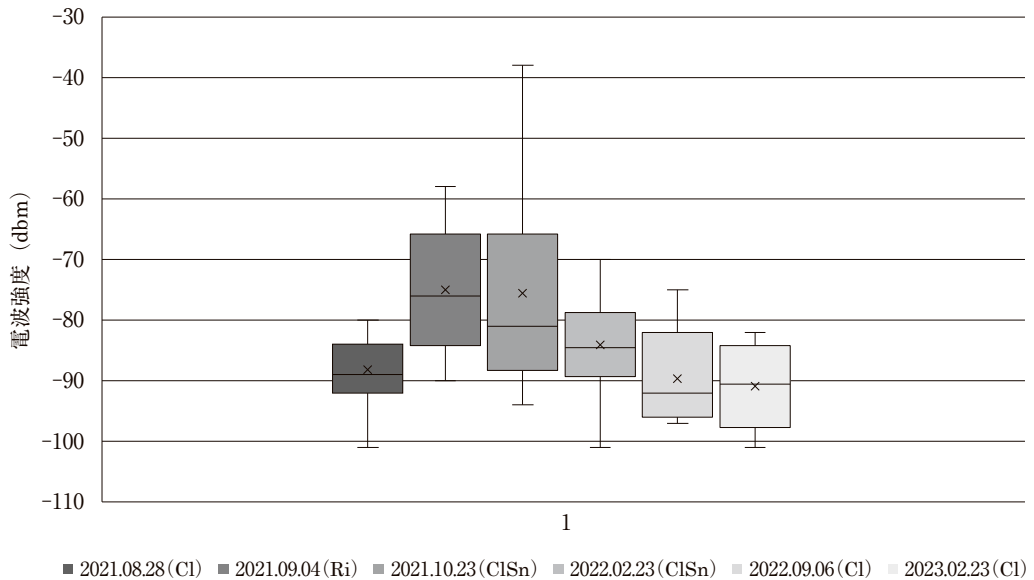
発信間隔：

ビーコンは、500ミリ秒毎に Advertising メッセージを発信するようにプログラムされている。このため、受信ができればその間隔は500ミリ秒になると考えられるが、実際にはかなり大きなゆらぎがあることが判明した。

図14-1に、測定日と各ビーコンで受信したビーコンの発信間隔（実際には Advertising メッセー



図13-5 測定日毎の電波強度の箱ひげ図 (RSSI 値)



ジの受信の間隔)を示す。最短で216ミリ秒、最長で4028秒となっており、約20倍もの差がある。

しかしながら、図14-2の箱ひげ図を見てみると、ところどころ外れ値があるものの、概ね500～1000ミリ秒に収まっている。

図14-3の、測定日毎の平均を見ると、699～1,184ミリ秒となっており、それほど大きなばらつきにはなっていない。

これをビーコン毎に見てみると、図14-4に示すように、#11と#18の発信間隔が長くなっている。#11については、2021年8月28日に4402ミリ秒を測定しているが、その後は500～1500ミリ秒に収まっている。

#18については、各回毎に、506, 4,028, 3,000, 2,032, 1,000ミリ秒となっており、1000ミリ秒を超えた回数が多い。しかしながら、受信距離は33歩となっており、必ずしも発信間隔だけではアプリの反応が決まるわけでもないということもわかる。

Advertising メッセージの発信間隔のばらつきは、主に、電池残量の関係と考えられる。プログラムは500ミリ秒で発信しようとするものの、Advertising メッセージを実際に飛ばすだけの電力が無い、ということが考えられる。

歩行速度を毎時4 km とすると1,000ミリ秒あたり約1 m (2歩) となり、発信間隔が2,000ミリ秒増加すると4歩の差になってくる。また、受信確率についても、数倍の差になってくるため、ビーコンの安定運用には重要なパラメータであるため、今後、さらに詳細な調査が必要である。

図14-1 測定日とビーコン毎の発信間隔

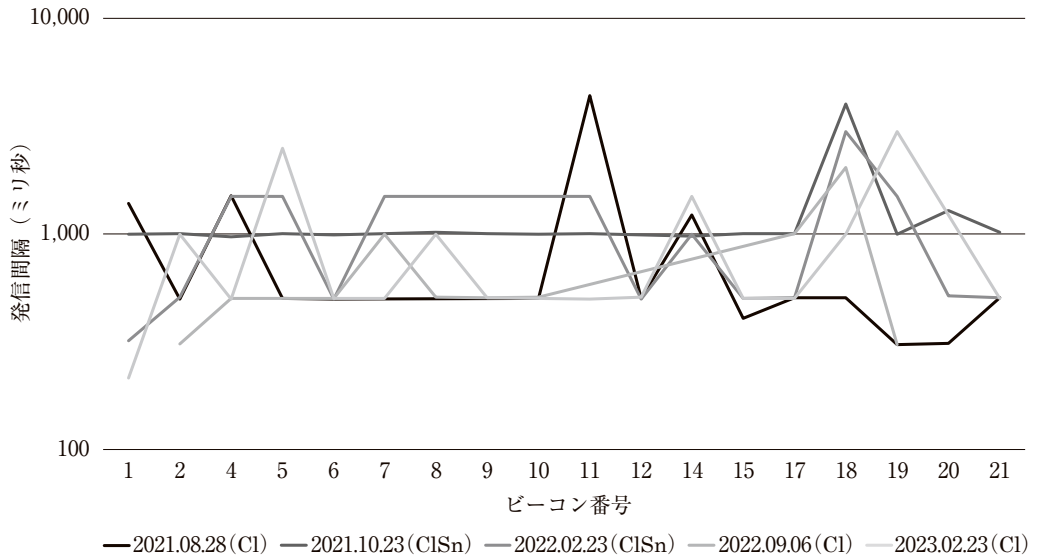


図14-2 測定日毎の発信間隔の箱ひげ図

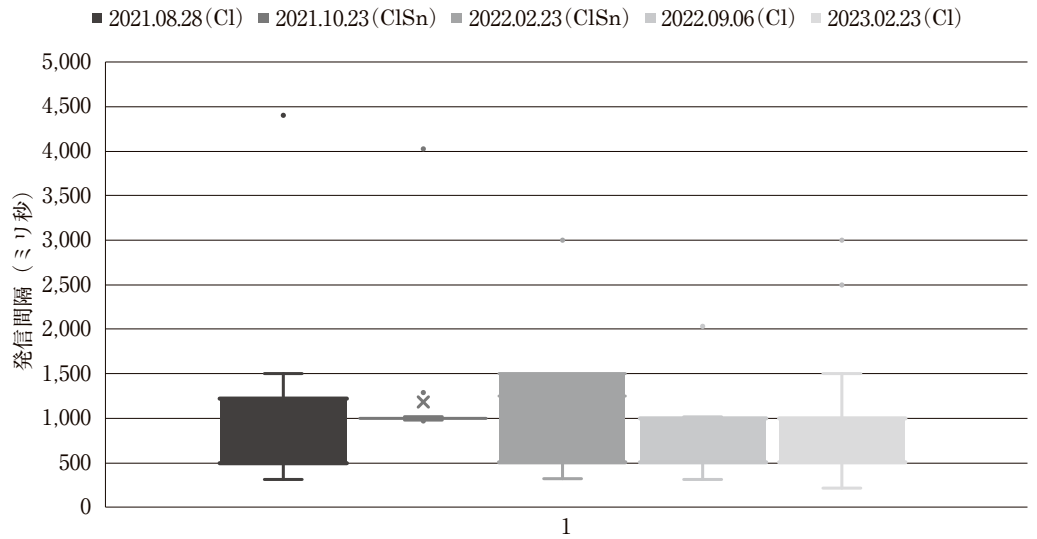


図14-3 測定日毎のビーコンの発信間隔の平均

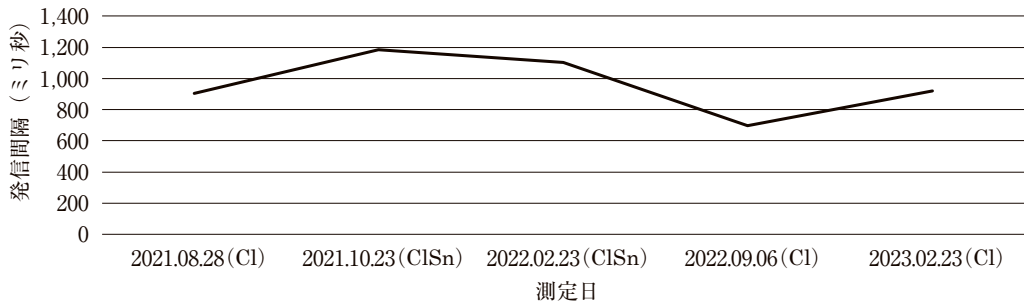
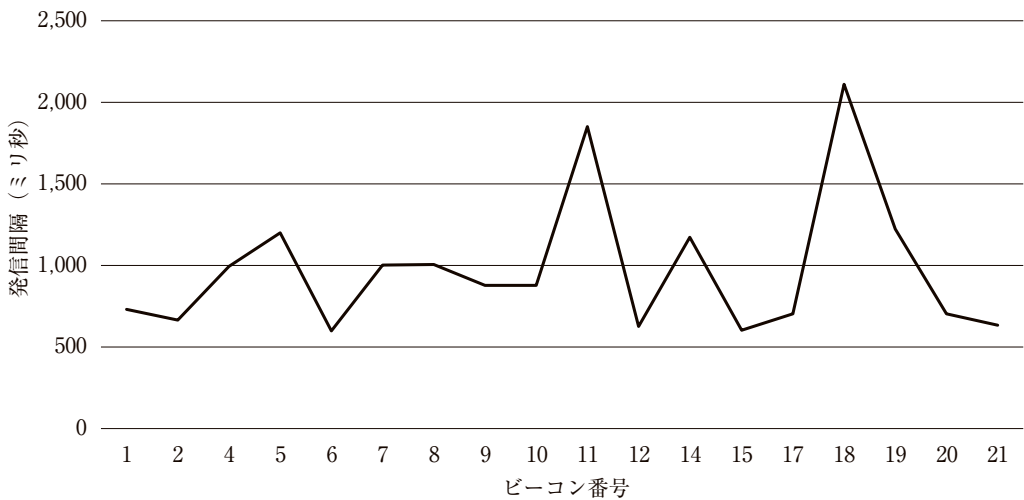


図14-4 ビーコン毎の発信間隔の平均



ビーコン付近の照度：

最後に、ビーコン付近の照度についての調査結果を示す。

図15-1に、調査日と各ビーコン付近の照度のグラフを示す。尚、照度はかなり大きな差となるので、y軸は対数としている。照度は、最大で408 Kルクス、最低で1.2ルクスであった。

また、図15-2に示すように、平均的には、40 K～140 Kルクスの照度があり、ビーコンの駆動には十分であると考えられる。図15-3の箱ひげ図では、10 Kルクス程度に中心が見える。

前述のように、エネルギー収支計算シミュレーター<sup>29)</sup>を用いると、図9のように、1日の日照時間が2時間以上なく、ほとんど光がない状態であっても、ビーコンの動作が期待できることになるが、太陽電池の表面の汚れ、山陰になることによる冬場の日照時間の短縮など、様々な要因が

29) 注26)と同じ。

図15-1 測定日とビーコン毎の照度

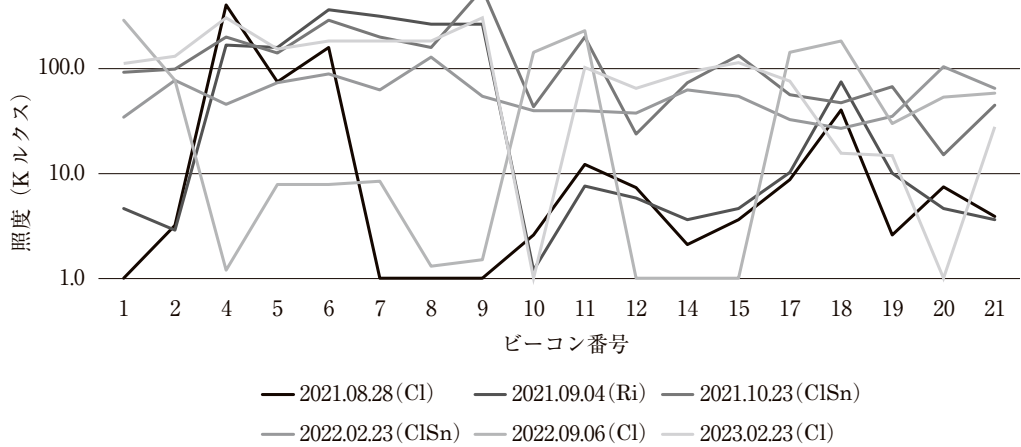


図15-2 測定日毎の照度の平均

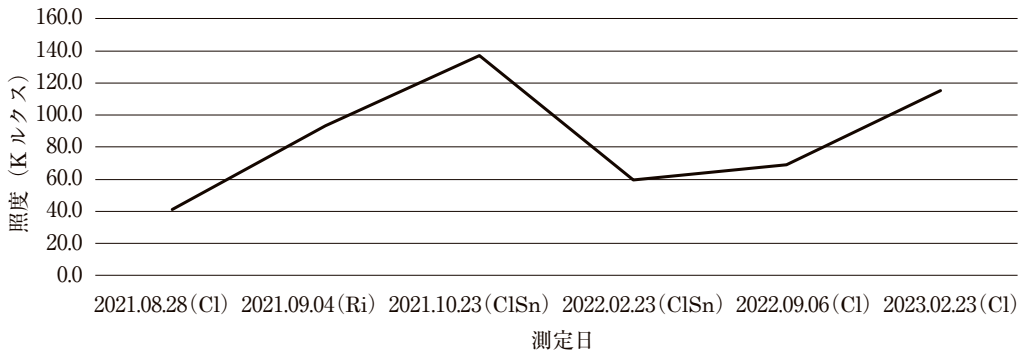


図15-3 測定日毎の照度の箱ひげ図

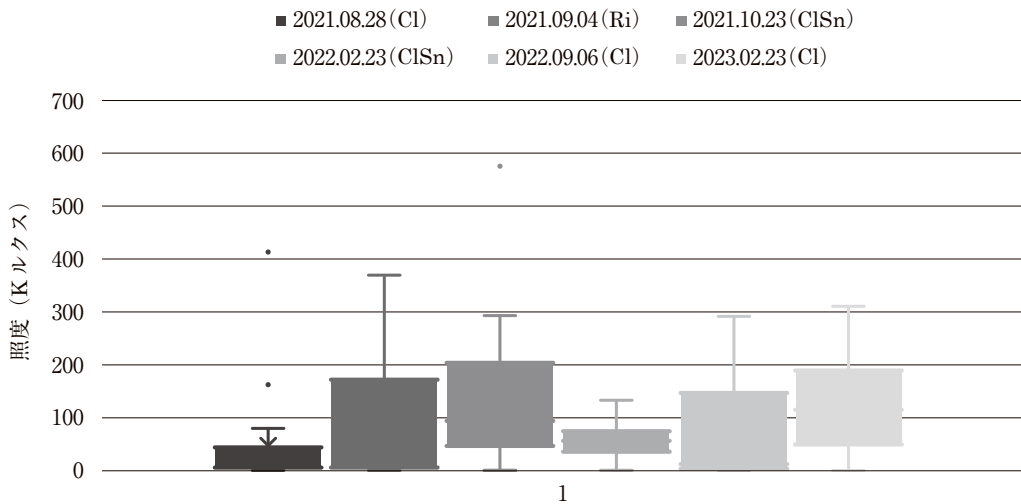
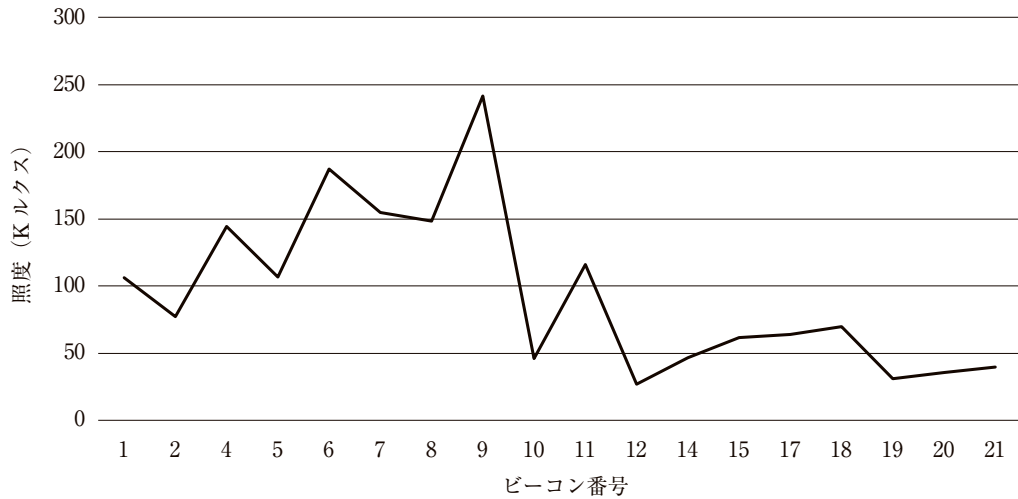


図15-4 ビーコン毎の照度の平均



影響し、充電量が影響を受ける。

図15-4のビーコン毎の照度の平均を見ると、10 Kルクス以上のものとしては、#1, 4, 5, 6, 7, 9, 11であった。これらのビーコンは、まわりが開けた、発電には好都合な条件が揃っている。#11以降、小田代原の、森林地帯に設置したものは、100 Kルクス以下となっており、特に、#12, #19は、体感的にも反応が悪いところである。充電量を増加するためのビーコンの設置方法については、今後さらに検討したい。

## 6. ビーコンネットワークの設計指針

戦場ヶ原のようなハイキングコースの観光案内を BLE ビーコンで行う場合、ビーコンの設置基準が重要となる。

ここでは、前章の測定結果から得られた、ビーコン設置基準について述べる。

- (1) なるべく高い位置に置く。案内看板 (#1, 11, 17) に取り付けると動作が安定する。また、解説標識であっても、なるべく高いところに設置する。
- (2) 水平に置くと、太陽電池の表面にゴミが溜まり発電能力が低下するため、角度を付けて設置する。
- (3) なるべく日当たりの良い場所に設置する。特に、木の葉が繁る夏場の状況を確認することが重要となる。
- (4) 木道、登山道など、電波を反射しやすい環境沿いに電波が飛ぶようにする。

これらの基準を念頭に置くことで、山岳地帯における、安定したビーコン案内を実現することが可能となる。

## 7. ま と め

奥日光におけるビーコン設置実験が始まったのが2017年度、これまで5年間の実験を行ってきた。2021年度からは太陽電池を交換し、ようやく安定した動作が確認できた。今後は、環境省日光自然環境事務所と意見交換をしつつ、湯滝や千手ヶ浜方面にもエリアを拡大していく予定である。

本稿で延べた BLE ビーコンの反応に関する課題だけでなく、2023年度はビーコンに貼り付けた太陽電池の接着面が剥がれるという故障が3件発生した(図16)。この原因としては、冬場はマイナス20度になり、また夏場には直射日光により50度以上になる屋外におけるエポキシ樹脂接着剤の安定性にも課題があることがわかった。今後は、太陽電池パネルをリベットで固定するなどの対策を導入することとしたい。

図16 太陽電池が剥がれた状態



謝辞：本研究を推進するにあたりご支援・ご助言をいただいた、環境省日光自然環境事務所の鶴飼様、内海様、江頭様に深謝する。

また、本実験に参加していただいた、中央大学ならびに宇都宮大学の学生に感謝する。

なお、本研究の一部は、科研費（17H 02249, 18K 111849, 20H 01278, 20H 05702, 22K 12598, 23H03649）の助成を受けている。また、本研究は、2014～2016年に、総務省の「戦略的情報通信研究開発推進事業（SCOPE）：地域 ICT 振興型研究開発」（142303001）として実施した内容をベースにしている。

(\*中央大学経済学部教授 博士(情報工学))

(\*\*中央大学経済学部特任教授)