

# IoT デバイス間の通信におけるアクセスポイントとクライアントの送信出力を変更することによる省電力化

北川 翔也<sup>1</sup> 山本 真也<sup>1</sup> 串田 高幸<sup>1</sup>

**概要：**Internet of Things (IoT) は、農業分野で利用され、IoT デバイスが農園に設置されている。デバイスが土壌の温度、水分量、水素イオン指数 (pH) や気温、光量などの環境データを継続的に取得している。農業で使用される IoT デバイスはバッテリー駆動で運用されるため、省電力化が重要な課題である。本稿では、IoT デバイス間の通信におけるアクセスポイント (AP) とクライアント (STA) の送信出力を変更することで、省電力化を図る手法を提案した。基礎実験では、送信出力の変更による通信が可能な距離やパケットロス率の変動を評価した。その結果、RSSI が-90[dBm] を下回ると通信が行えなくなり、パケットロスは発生しなかった。また、評価実験では、AP と STA の通信距離を 50[m] と 100[m] 離して実験を行った。送信出力を最大の 21[dBm] にした場合と、提案手法に基づいて送信出力を変更した場合の消費電力を比較した。その結果、AP の削減電力量は 50[m] では 21[dBm] で 421.24[mW] から 2[dBm] の 415.77[mW] になり、約 5.47[mW] 削減された。削減率は約 1.29 %であった。100[m] では 21[dBm] の 421.24[mW] から 15[dBm] の約 416.39[mW] で約 4.85[mW] になり、削減率は約 1.15 %であった。STA の削減電力量は 50[m] で、21[dBm] の約 180.51[mW] から 2[dBm] の約 192.54[mW] となり、約 12.03[mW] 増加し、削減率は約 6.66 %増加した。100[m] では 21[dBm] の約 180.51[mW] から 15[dBm] の 192.19[mW] となり約 11.68[mW] 増加し、約 6.47 %増加した。

## 1. はじめに

### 背景

Internet of Things(IoT) は、スマートホーム、スマート交通管理、スマートシティ、農業の分野で広く使用されている [1]。農業分野では IoT デバイスが農園に設置され、土壌の温度、水分量、水素イオン指数 (pH)、気温、光量といった環境データを継続的に取得している [2,3]。取得されたデータはクラウドサーバーに送られ、リアルタイムで評価されている [4]。評価されたデータにより、農家は農作物の生育状況を容易に把握できるようになっている。この結果、必要な水分量や肥料の量を正確に調整できるようになり、過剰な水や肥料の使用が抑えられ、余分なコストや環境への負担が減少している。しかし、IoT デバイスや通信ネットワークにおけるセキュリティの確保、個人情報やデータの取り扱いに関するプライバシー保護、そして安定した電力供給が必要とされる課題がある。また、農業に使用されている IoT デバイスはバッテリー駆動で運用されている [5]。バッテリー運用に伴い、長期運用を実現するため、省電力化が求められる。

IoT デバイスの省電力化を実現する手法の一つとして、送信出力の調整が挙げられる。IoT デバイス同士の通信品質を評価する際には、Received Signal Strength Indicator (RSSI) がよく使用される [6]。RSSI は、受信機が取得した信号の強度を測定する指標であり、通信性能の評価において重要な役割を果たす [7]。その他の省電力化を実現する手法としては、Wireless Sensor Network(WSN) を適用したルーティングやトポロジー制御、環境モニタリングがある。この手法にも距離推定で RSSI が使用される [8]。利点として、低消費電力がある [8]。送信出力を高めると、送信先ノードに届く信号が強まり、それに伴い RSSI 値も上昇する。一方で、送信出力を低下させると、送信先ノードに届く信号は弱まり、RSSI 値も減少する。この特性を活用することで、送信出力を動的に制御する仕組みを構築することができる。

### 課題

課題は、IoT デバイス同士の通信において必要以上の送信出力で通信することにある。アクセスポイント (AP) として機能する IoT デバイスとクライアント (STA) として機能する IoT デバイスとの通信において、最も遠い STA に送信出力を合わせて設定することにより、最も近い STA

<sup>1</sup> 東京工科大学コンピュータサイエンス学部  
〒192-0982 東京都八王子市片倉町1404-1

に対して過剰な送信出力が設定される。過剰な送信出力により、余分なエネルギー消費が生じ、IoT デバイスの稼働時間が減少する問題がある。具体的には、基礎実験より RSSI の値が-90[dBm] を下回ると通信の接続が切れた。また、通信中にパケットロスが発生することはなかった。RSSI が-50[dBm] の場合、通信が途切れる-90[dBm] の値まで、RSSI の差が 40[dBm] あり、過剰な送信出力であるといえる。図 1 に過剰な送信出力を行っている状態を示す。この状態は、IoT デバイス同士の通信が一定距離で通信が設計されていない環境では特に顕著である。

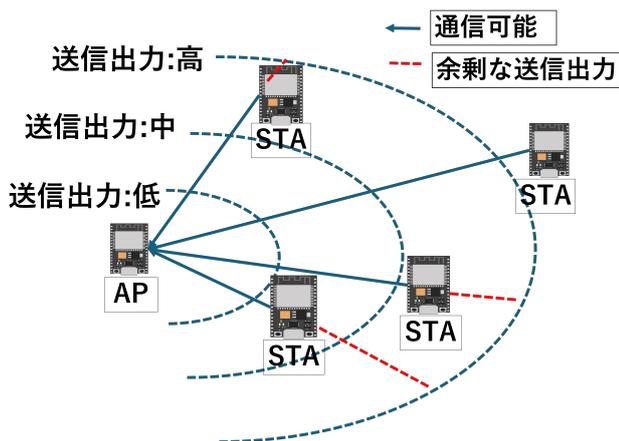


図 1 過剰な送信出力を行っている例

## 基礎実験

基礎実験では、送信出力の変更による IoT デバイス間の通信が可能な距離と RSSI 値の変動、およびパケットロスを調査した。実験環境は東京工科大学八王子キャンパスの総合グラウンドで実施した。

実験では、ESP32 を 2 台使用する。ESP32 の 1 台を AP とし、もう 1 台を STA に分けた。測定する最大距離は 100m とし、10m ごとに距離を変えて RSSI とパケットロスを測定した。変更する送信出力は 2[dBm]、5[dBm]、10[dBm]、15[dBm]、20[dBm]、21[dBm] である。実験の手順を以下に示す。

(1) 最初の距離で RSSI を測定。

AP 側と STA 側の ESP32 を 10[m] 離し、RSSI を 100 回記録する。

(2) 距離を 20[m] に変更し、RSSI を測定。

AP 側と STA 側の ESP32 の距離を 20 メートルに設定し、RSSI を 100 回記録する。

(3) 距離を段階的に増加させて測定。

同様に、距離を 30[m]、40[m] と増やしていき、最大距離の 100[m] 地点まで RSSI を 100 回ずつ記録する。

(4) 送信出力を変更。

100 メートル地点での測定が完了した後、ESP32 の送信出力を次の設定値（例：20[dBm]）に変更する。(5) 再度測

定を繰り返す。

手順 1 から手順 3 を再度繰り返し、異なる送信出力設定での RSSI を測定する。

基礎実験の結果を図 2 に示す。図 2 の横軸は距離を示

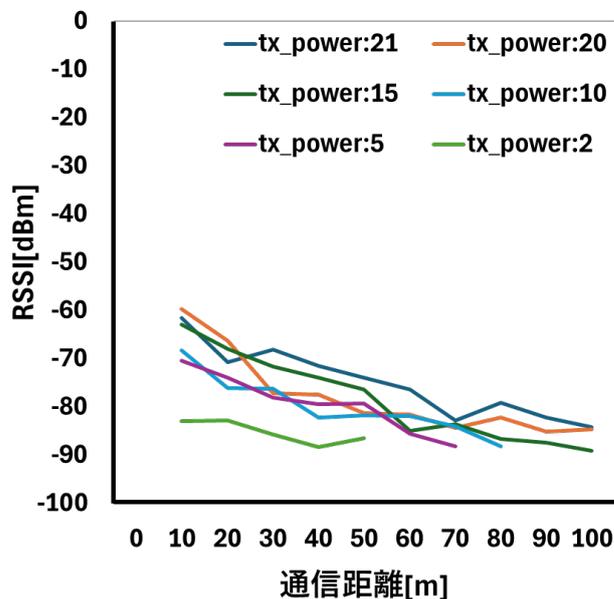


図 2 送信出力を変更したことによる RSSI の変動

している。単位は [m] である。縦軸は測定した RSSI の平均値を示している。単位は [dBm] である。基礎実験から、RSSI 値が-90[dBm] より下回ると通信が不可能となることが分かった。また、送信出力が 10[dBm] であるとき、80[m] までしか通信ができず、5[dBm] の場合も 70[m] で通信ができないことから、送信出力を上げていくことによって通信可能な距離が短くなっていることがわかる。今回の基礎実験ではパケットロス率を測定していたが、パケットロスが発生することはなかった。これからのことから、RSSI が-90[dBm] を下回らなければ、データの欠損がなく、通信が行えることがわかる。また、通信距離が 50[m] までであれば送信出力が 2[dBm]、50[m] 以上 70[m] までであれば 5[dBm]、70[m] 以上 80[m] まででは 10[dBm]、80[m] 以上 100[m] では 15[dBm] が通信が可能であり、最小限の送信出力であることが分かった。

## 各章の概要

第 2 章では関連研究について説明する。第 3 章では本稿における提案について説明する。第 4 章では提案手法の実装について説明する。第 5 章では提案手法をもとに実験をし、評価する。第 6 章では本稿の提案手法について議論を行う。第 7 章では本稿のまとめを行う。

## 2. 関連研究

ボディエリアネットワーク (BAN) 用の新しい送信電力



1度、AP から STA に通信を行い、RSSI を測定する。測定した RSSI をもとに送信出力を低下させる。低下させた送信出力で通信が可能であった場合、さらに送信出力下げる。通信が不可能になるまで繰り返し送信出力を下げ、通信が不可能になった送信出力の一段階上の送信出力を STA に設定する。

(2)AP の送信出力の変更

STA で決定した送信出力の値を AP に送信する。AP は送信出力を STA から受信した送信出力の値に変更する。

ユースケース・シナリオ

IoT デバイスを活用して、農作物に関連する環境データを収集する。環境データにより、土壌の水分状態を把握することが容易となり、水の無駄遣いを防ぐことが期待されている。また、収集した様々なデータを分析し、収穫量を予測することが農業分野において期待されている [12]。本稿では、農地のモニタリングへの応用を前提としている。農地のモニタリングでは、土壌の温度、土壌の水分量、土壌の pH、気温、光量の環境データを収集している。なお、電波干渉や障害物の影響、および IoT デバイスはバッテリー駆動で運用されていることとする。図 4 はユースケースシナリオである。

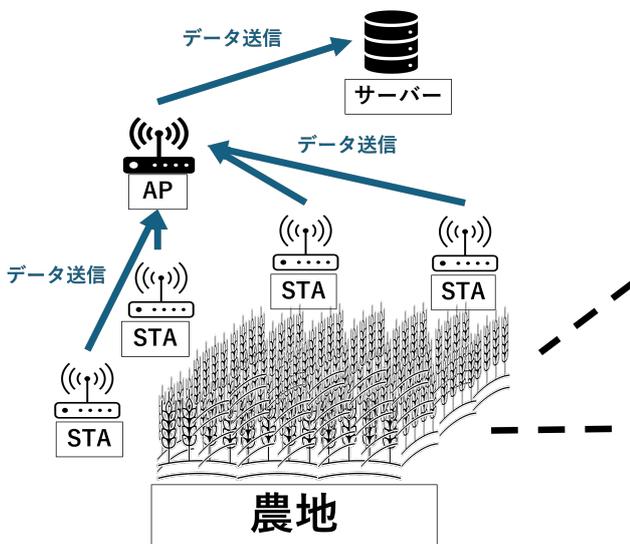


図 4 ユースケースシナリオ

4. 実装

IoT デバイスには ESP32 を使用し、IoT デバイスのソフトウェアは MicroPython で実装する。ESP32 同士の通信ではソケット通信をもちいる。送信出力は 2[dBm], 5[dBm], 10[dBm], 15[dBm], 20[dBm], 21[dBm] である。図 5 に通信確立フェーズの概要を示す。AP は AP モードを起動し、アドレスとポートの初期設定を行う。また、STA の接続要求

があるまで AP モードを起動した状態で待機する。STA は STA モードを起動し、アドレスとポートの初期設定を行う。このとき、AP と同様の値にしなければならない。送信出力の初期設定では最大出力である 21[dBm] とする。初期設定後に AP に対し接続要求を送信する。

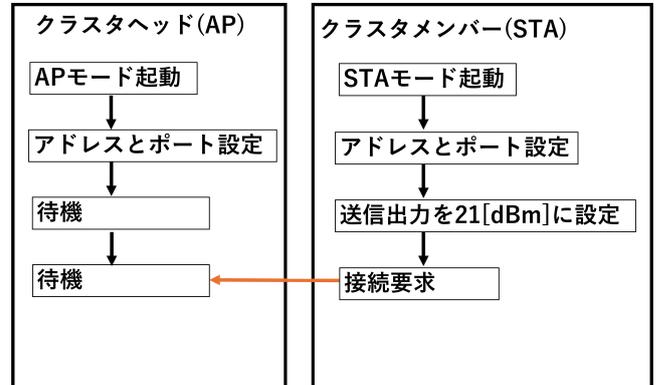


図 5 通信確立フェーズの概要図

図 6 に AP & STA フェーズの概要を示す。AP は STA に対し RSSI を送信し、STA から送信出力を受信するまで待機する。STA では AP から RSSI を受信し、評価する。評価した RSSI をもとに送信出力を変更する。

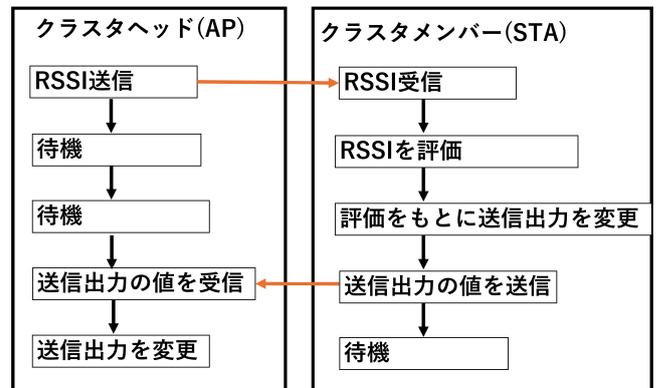


図 6 AP & STA フェーズの概要図

5. 評価実験

送信出力を提案方式に変えた場合の消費電力と送信出力を最大にした場合の消費電力を測定し比較を行う。

実験環境

図 7 に実験環境の概要を示す。実験では IoT デバイスは ESP32 を使用し、消費電力を測定するために、シャント抵抗をもちいて電流と電圧を測ることができるセンサーモジュールの INA219 を使用する。MicroPython をもちいて実装している。測定場所は東京工科大学の総合グラウンドである。実験距離は AP と STA のデバイス距離が 50[m] 離

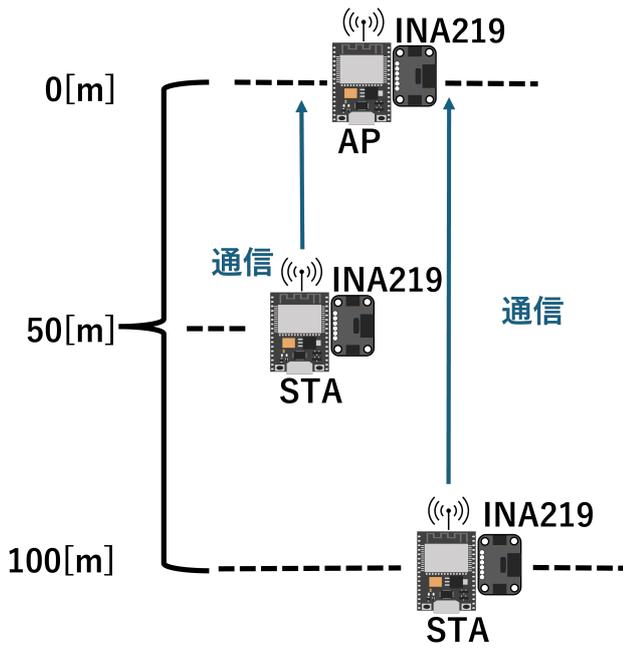


図 7 実験環境の概要図

れた場合と 100[m] 離れた場合で行った。提案手法で設定した送信出力で通信を 1[s] に 1 パケット送信し、60[s] 間消費電力を測定した。また、送信出力が最大である 21[dBm] に設定した場合の消費電力も同様の方法で測定した。

## 実験結果と分析

### AP の消費電力

AP の消費電力は図 8 に示す。縦軸は消費電力 [mW] であり、横軸は経過時間 [s] を示している。AP の消費電力を

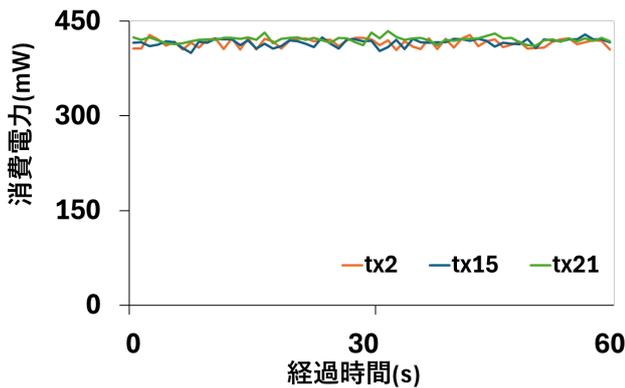


図 8 AP の消費電力

送信出力ごとに平均を出した。2[dBm] では約 415.77[mW], 15[dBm] では約 416.39[mW], 21[dBm] では約 421.24[mW] であった。この平均値から送信出力を上げると消費電力が増加することがわかった。また、提案手法によって削減した電力量は 50[m] では、21[dBm] の 421.24[mW] から 2[dBm] の 415.77[mW] になり、約 5.47[mW] 削減された。削減率は

約 1.29 % であった。100[m] では 21[dBm] の 421.24[mW] から 15[dBm] の約 416.39[mW] で約 4.85[dBm] になり、削減率は約 1.15 % であった。評価実験において発生したスパイクは使用した ESP32 の回路における設計の特性や、製造時のばらつきが原因であると考えられる。

### STA の消費電力

STA の消費電力は図 9 に示す。縦軸は消費電力 [mW] であり、横軸は経過時間 [s] を示している。

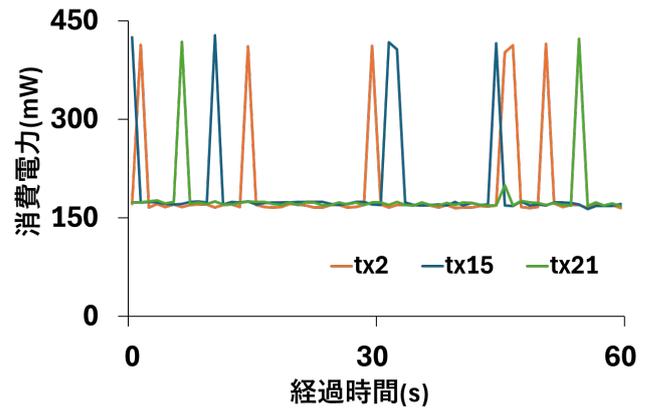


図 9 STA の消費電力

STA の平均値は 2[dBm] では約 192.54[mW], 15[dBm] では約 192.19[mW], 21[dBm] では約 180.51[mW] であった。また、提案手法によって、削減した電力量は 50[m] では、21[dBm] の約 180.51[mW] から 2[dBm] の約 192.54[mW] となり、約 12.03[dBm] 増加し、削減率は約 6.66 % 増加した。100[m] では 21[dBm] の約 180.51[mW] から 15[dBm] の 192.19[mW] となり約 11.68[dBm] 増加し、約 6.47 % 増加した。各送信出力でスパイクが確認された。図 10 に STA を起動していない状態で計測した消費電力を示す。図 9 で

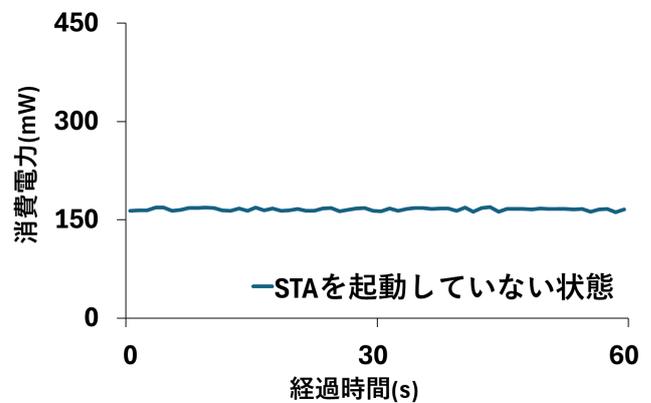


図 10 STA を起動していない時の消費電力

起きていたスパイクは確認されなかった。図 10 の結果より、STA の起動によってスパイクが生じることが分かる。

STA を起動中にデータの送信や Wi-Fi のスキャンが行われていることが原因である。また、AP の消費電力は送信出力を増やすことで増加したが、STA の消費電力は AP のように増加はしなかった。

図 11 は STA の消費電力が送信出力の増加に伴って増えなかった原因を調べるために STA の消費電力を 600 秒間測定した。図 11 より、平均の消費電力は 2[dBm] では約

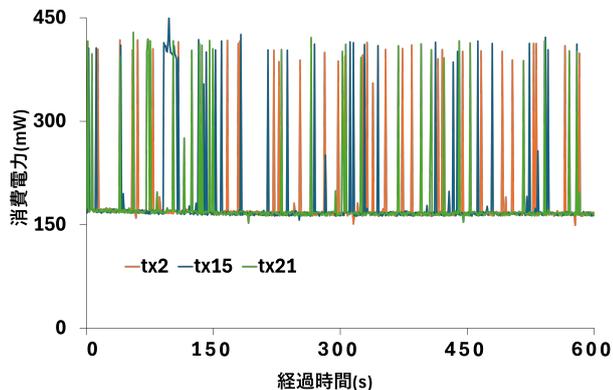


図 11 600 秒間の STA の消費電力

179.48[mW] で、15[dBm] では約 183.98[mW] で、21[dBm] では約 179.29[mW] であった。また、各送信出力のスパイクの発生回数は 2[dBm] で 31 回、15[dBm] で 44 回、21[dBm] で 32 回計測された。結果より、STA の消費電力が送信出力の増加に伴って増えなかった原因は、スパイクの発生回数によって平均の消費電力が増加するためである。

STA と AP の平均消費電力を送信出力、2[dBm]、5[dBm]、10[dBm]、15[dBm]、20[dBm]、21[dBm] ごとに測定し求めた。STA の送信出力ごとの平均消費電力を表 1 に示す。その結果、2[dBm] では約 192.54[mW]、5[dBm] では約 178.51[mW]、10[dBm] では約 192.03[mW]、15[dBm] では約 192.19[mW]、20[dBm] では約 184.44[mW]、21[dBm] では約 180.51[mW] であった。STA の平均消費電力から、送信出力を上げることによる消費電力の増加は見られなかった。AP の送信出力ごとの平均消費電力を表 2 に示

送信出力 [dBm]	2	5	10	15	20	21
消費電力 [mW]	192.54	178.51	192.03	192.19	184.44	180.51

表 1 STA の平均消費電力

す。その結果、2[dBm] では約 415.77[mW]、5[dBm] では約 418.23 [mW]、10[dBm] では約 417.01[mW]、15[dBm] では約 416.39[mW]、20[dBm] では約 418.41[mW]、21[dBm] では約 421.24[mW] であった。AP の平均消費電力から送信出力を上げることによる消費電力の増加がみられた。

送信出力 [dBm]	2	5	10	15	20	21
消費電力 [mW]	415.77	418.23	417.01	416.39	418.41	421.24

表 2 AP の平均消費電力

## 6. 議論

本稿では、前提として障害物が存在しない環境を想定したが、これは実際のユースケースを十分に反映したものとはいえない。また、送信出力を調整する基準として RSSI のみをもちいたが、RSSI は測定の際のばらつきや環境の影響を受けやすいという課題がある。このため、RSSI のみを基準にした送信出力の調整では、通信の評価や制御の信頼性が十分に確保できない場合がある。今後の課題として、RSSI に加えてリンク品質指標 (LQI) やパケット受信率 (PRR) の指標を RSSI と組み合わせることで、ばらつきや環境の影響を受けずらい評価ができると考える。また、実際のユースケースを考慮した障害物を含む環境での評価が求められる。

## 7. おわりに

本稿では、AP と STA の送信出力を RSSI をもとに変更した。基礎実験から RSSI が-90[dBm] を下回ると通信ができないことがわかった。送信出力を変更のする際はマージンを取るために RSSI が-80[dBm] になようにした。また、通信距離が 50[m] までであれば送信出力が 2[dBm]、50[m] 以上 70[m] までであれば 5[dBm]、70[m] 以上 80[m] まででは 10[dBm]、80[m] 以上 100[m] では 15[dBm] が通信が可能であり、最小限の送信出力であることが分かった。評価実験では 50[m]、100[m] で AP と STA の通信を行い、送信出力を最大である 21[dBm] にした場合の通信と送信出力を変更した場合の通信を行い、消費電力の比較を行った。実験の結果、AP の消費電力は、50[m] では 5.47[mW] の削減が確認され、100[m] では 4.85[mW] の削減ができた。一方、STA の消費電力については、50[m] で 12.03[mW] 増加し、100[m] では 11.68[mW] 増加した。データの送信や Wi-Fi のスキャンが重なったことにより消費電力が削減できなかった。

**謝辞** 本テクニカルレポートの作成にあたり、ご助言を賜り、丁寧に指導して下さいました東京工科大学コンピュータサイエンス学部の筒井 優貴、越後谷 滯、宮本 港斗さんに感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Dagar, R., Som, S. and Khatri, S. K.: Smart Farming – IoT in Agriculture, *2018 International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*, pp. 1052–1056 (online), DOI: 10.1109/ICIRCA.2018.8597264 (2018).
- [2] Karthiga, R., Devi, C. L. B., Janaki, R., Gayathri, C., Pandi, V. S. and Shobana, D.: IoT Farm: A Robust Methodology Design to Support Smart Agri-

- cultural System Using Internet of Things with Intelligent Sensors Association, *2023 7th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, pp. 1332–1337 (online), DOI: 10.1109/ICECA58529.2023.10395635 (2023).
- [3] Chaikhawang, S., Jantahjirakowit, C. and Fongmanee, S.: IoT for Smart Farm: A Case Study of the Fertilizer Mixer Prototype, *2021 Joint International Conference on Digital Arts, Media and Technology with ECTI Northern Section Conference on Electrical, Electronics, Computer and Telecommunication Engineering*, pp. 136–139 (online), DOI: 10.1109/ECTIDAMT-NCON51128.2021.9425708 (2021).
- [4] Amin, M. S., Rizvi, S. T. H., Iftikhar, U., Malik, S. and Faheem, Z. B.: IoT Based Monitoring and Control in Smart Farming, *2021 Mohammad Ali Jinnah University International Conference on Computing (MAJICC)*, pp. 1–6 (online), DOI: 10.1109/MAJICC53071.2021.9526247 (2021).
- [5] Wang, Z., Zhang, Y., Wang, W., Feng, X., Xiao, Q., Kuang, Y., Zhao, B. and Luo, Y.: An Energy-Efficient All-Dynamic Multiparameter Sensor for Battery-Less Smart Nodes in Agricultural Internet-of-Things, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 24, No. 13, pp. 21426–21435 (online), DOI: 10.1109/JSEN.2024.3396842 (2024).
- [6] Kim, S. and Eom, D.-S.: Link-State-Estimation-Based Transmission Power Control in Wireless Body Area Networks, *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, Vol. 18, No. 4, pp. 1294–1302 (online), DOI: 10.1109/JBHI.2013.2282864 (2014).
- [7] Sadowski, S. and Spachos, P.: RSSI-Based Indoor Localization With the Internet of Things, *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 30149–30161 (online), DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2843325 (2018).
- [8] Luo, Q., Peng, Y., Li, J. and Peng, X.: RSSI-Based Localization Through Uncertain Data Mapping for Wireless Sensor Networks, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 16, No. 9, pp. 3155–3162 (online), DOI: 10.1109/JSEN.2016.2524532 (2016).
- [9] Kim, S., Kim, S. and Eom, D.-S.: RSSI/LQI-Based Transmission Power Control for Body Area Networks in Healthcare Environment, *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, Vol. 17, No. 3, pp. 561–571 (online), DOI: 10.1109/TITB.2012.2227335 (2013).
- [10] Priyesh, P. P. and Bharti, S. K.: Dynamic transmission power control in wireless sensor networks using P-I-D feedback control technique, *2017 9th International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS)*, pp. 306–313 (online), DOI: 10.1109/COMSNETS.2017.7945391 (2017).
- [11] Ishibashi, N., Mizutani, K. and Harada, H.: An Upward Routing Method with Adaptive Transmission Power Control in Wi-SUN FAN, *2022 IEEE 8th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, pp. 1–2 (online), DOI: 10.1109/WF-IoT54382.2022.10152243 (2022).
- [12] Han, Y., Lu, G., Guo, T., Qie, T. and Zhang, Q.: Design of Agriculture Intelligent Irrigation System based on Wireless Sensor Network, *2020 Chinese Automation Congress (CAC)*, pp. 3230–3233 (online), DOI: 10.1109/CAC51589.2020.9326952 (2020).