LPWAを用いたエナジーハーベストなニホンミツバチの巣箱センシングシステムの開発

Development of an energy-harvest driven japanese honeybee hive sensing system with LPWA

福田 修之 [1 *]　松田 裕貴 [1]　吉川 浩 [2]
Shuichi Fukuda,[1] Yuki Mastuda,[1] Hiroshi Yoshikawa[2]

[1] 奈良先端科学技術大学院大学　Nara Institute of Science and Technology
[2] NPO 法人 ビーフォレスト・クラブ　Bee Forest Club

要旨: 近年，自然林の激減に伴い，ニホンミツバチの餌場や棲める空洞のある樹木がなくなっている．ニホンミツバチは，植物の花粉を運び受粉させるポリネーター（送粉者）として，古くより日本の森の植生環境を整える重要な役割を果たしている．しかし，このニホンミツバチの生態は解明されていない点が多く，外来種がもたらしたアカリンダニなどの病気や自然林の激減により，年々減少傾向にあるとされている．NPO 法人ビーフォレスト・クラブは，ニホンミツバチの減少の解決を目的とし，ニホンミツバチが繁殖可能な住処となる巣箱の開発・設置に取り組んでいる（2020 年 11 月現在，日本全国 90 拠点に設置）．しかしながら，開発している巣箱は自然に存在する巣環境を完全には再現できておらず，ニホンミツバチが住みづらい環境が存在することから，営巣率（巣箱の数に対して，実際に巣箱に巣を作った割合）をどのように向上するかが課題となっている．巣箱の改善には，温湿度の条件など営巣に必要な環境条件を明らかにする必要があるが，その環境は現在のところ科学的に調査されていないのが実情である．こうした背景から，本研究では，ニホンミツバチが営巣・繁殖しやすい巣環境をセンシングにより明らかにすることを目的とし，ニホンミツバチの巣箱センシングシステムを提案する．本稿では，巣箱センシングシステムの実装について述べ，動作確認実験を行った結果について報告する．動作確認実験の結果，太陽の光が弱い冬場の 2 日間の太陽光で充電を完了させ，1 週間継続して動作可能である事を確認した．さらに，2020 年冬季の 3 週間，実際に自然環境に設置されている巣箱にシステムを取り付け，温湿度の測定を行った結果，実環境での継続的な動作が可能である事が確認された．また，夜間の結露によるノイズの発生といった今後の課題も確認された．

1　はじめに

近年，自然林の激減に伴い，ニホンミツバチの餌場や棲める空洞のある樹木がなくなっている．ニホンミツバチは，植物の花粉を運び受粉させるポリネーター（送粉者）として，古くより日本の森の植生環境を整える重要な役割を果たしている．しかし，このニホンミツバチの生態は解明されていない点が多く，外来種がもたらしたアカリンダニなどの病気や自然林の激減により，その個体数が少なくなっていると言われている．NPO 法人ビーフォレスト・クラブ[1]（以後，ビーフォレストと称す）は，ニホンミツバチの減少の解決を目標にミツバチの住処となる巣箱の開発・提供を行っている [1]．2020 年 11 月現在，日本全国の森や農園など 90 拠点にミツバチの巣箱を設置している．

幼虫を育てるミツバチの巣は，温湿度に関して非常に繊細な環境条件が存在し，年間温度が一定であるように働きバチの活動により保たれている．また，自然に生息するミツバチは，元来，自然の樹木のウロ（洞）に巣を作る事が多い．図 1 に示すように，自然の樹木のウロの周りには維管束帯があり，夏はより多くの水分を葉に送るために多くの水分が流れている．このため，樹木のウロの温度は，温度の高くなる夏場において，比較的涼しい状態で保たれている．樹木のウロは偶発的にできるものであり，数多く存在するものではない．また，ミツバチが巣として使用できるウロには条件があり，穴の入り口の大きさが約 5–10mm 程度である必要がある．これは，天敵であるスズメバチなどの狩りバチの侵入を防ぐためである．

*連絡先：奈良先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科
〒 630-0192 奈良県生駒市高山町 8916 番地 5
E-mail: fukuda.shuichi.fs5@is.naist.jp
[1] https://www.beeforest.jp/

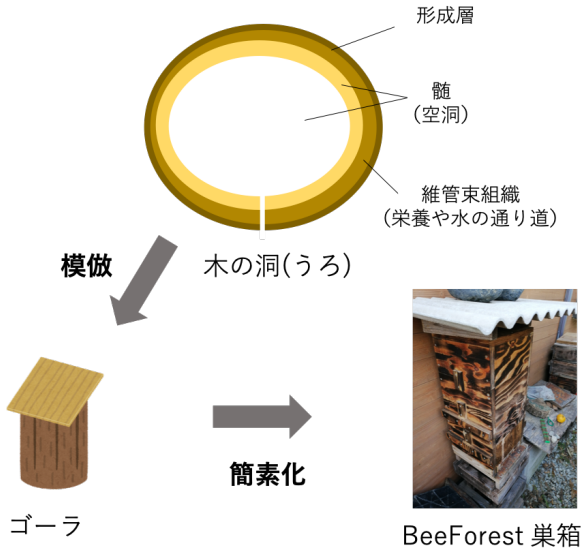

図 1: ミツバチの巣箱の種類

一方で，古くから養蜂などに用いられる人工的なミツバチの巣のひとつに，ゴーラというものが存在する．これは丸太をの中をくりぬき，その上下に板を挟んだのち，ミツバチの出入りが可能な小さな穴をあけたもので，簡易的に自然のミツバチの巣を模倣して，作り出したものである．また，森の再生活動を目的として養蜂ではなく自然のミツバチの繁殖を目標に，ミツバチの巣箱を全国に提供しているビーフォレストは，ゴーラをより簡易に構築可能とするため，図 1 の右下に示す木材板により組み立て可能な巣箱の開発を行っている．これは，ゴーラの大きさ・重さによって移動に掛かる負担が大きくなる問題を解決する狙いがある．このように，人工的な巣箱は自然の巣箱を模倣し，様々な工夫を経て，開発されてきた．ビーフォレストでは，2020 年 11 月時点で全国 90 箇所以上，450 個以上の巣箱を設置しているが，営巣率（巣箱の数に対して，実際に巣箱に巣を作った割合）の高いエリアと低いエリアが存在することがわかっている．日本全国に設置する巣箱は，夏冬の変化や温湿度の条件など，非常に繊細な環境条件が存在すると言われているが，これまでその環境条件は科学的に調査されておらず，どのような環境がミツバチにとってよいのかは明らかとなっていない．

本研究の目的は，ニホンミツバチが営巣・繁殖しやすい巣箱環境を明らかにすることである．本稿では，ニホンミツバチの巣箱センシングシステムの開発について報告する．

2　関連研究

西洋ミツバチの生態調査を行った研究では，採餌から帰巣した西洋ミツバチ (採餌バチ) は，尻振りダンスと呼ばれる行動で蜜源の所在地を仲間の西洋ミツバチに伝えていることが Frisch らの研究から知られている [2]．これらの知見をもとに，高橋らは，巣内でのニホンミツバチの行動観察を目的とし，RFID センサと画像処理を併用して，ニホンミツバチのコミュニケーション行動の自動検出をおこなうシステムを構築している [3]．しかし，高橋らの研究は，巣箱内のミツバチの行動をセンシングし，その結果を基にした生態調査を対象としているが，温湿度の環境情報が，営巣にどのように影響するかを対象としていない．

また，一般にミツバチの育児域の温度が 37 °C 以上で持続した場合，幼虫が変態できなくなるなどの問題があるため，ミツバチにとって巣の温度条件は非常に重要である．そのことから，一般的なミツバチの巣では，特に育児域の温度は平均 34.5 °C で一定に保たれていることが知られている．菅原らは，ニホンミツバチの巣の中でも開放巣（巣箱ではなく，軒下などに外部にむき出しとなる形で形成されている巣）を対象として，巣の育児圏の温度の調査を冬期と夏期に行った [4]．その結果，ニホンミツバチの巣の育児域では年間を通して 35.7 ± 1.0 °C に保たれていることが明らかとなっている．

3　巣箱センシングシステムの提案

3.1　ビーフォレストの巣箱の設置状況

多様で豊かな自然植物が生息する森の復興と再生支援を目標に，激減するニホンミツバチの繁殖環境作りを行うビーフォレストでは，全国各地にニホンミツバチの巣箱を設置する活動を行っている．2020 年 11 月時点で，日本全国 90 拠点，450 個以上のニホンミツバチの巣箱を設置している．巣箱を設置したとしても，必ずしもその巣箱にニホンミツバチが巣を作る（営巣する）とは限らず，その営巣率は拠点によって大きく異なることがこれまでの活動で明らかとなっている．2019 年の状況では，全国での平均営巣率は 17.8%となっているものの，低いところでは 0%といった拠点も存在し，そのばらつきは大きいといえる．これらの理由として，ニホンミツバチの巣は，前述したように非常に繊細な環境条件が存在する事が考えられる．そのため，どのような巣箱の環境が好ましいかを実際に設置されている巣箱をセンシングし，その条件を分析するとともに，巣箱の設置位置の改善や巣箱自体の改良を行うことが必要となると考えられる．環境条件を明らかにするた

めには，複数拠点・複数箇所での同時並行でのセンシング・データ収集が不可欠である．

3.2 システム要件

こうしたニホンミツバチの巣箱設置状況や目的を踏まえ，本研究で提案するニホンミツバチの巣箱のセンシングシステムで必要となる要件を以下に示す．

要件 1： 巣箱の環境・巣の大きさの測定
自然に存在する樹木のウロは，夏場は涼しく冬場は暖かい環境となっている．ニホンミツバチはこのような環境を好み住み着くが，人工的に製作される巣箱がどのような環境条件となっているか，また，ニホンミツバチがどのような環境条件が好むのかについては明らかになっていない．さらに，営巣状況を把握する指標として巣そのものの成長が挙げられるが，巣の大きさを測定する方法が確立されていない．

要件 2： エナジーハーベストなセンシング
提案するシステムを搭載する巣箱は，電源が確保できない自然界に設置されることが想定される．そのため，太陽光パネルやその他の発電方式によって発電・蓄電を行い，システムを駆動する必要がある．

要件 3： 通信環境が乏しい状況下でのデータ収集
巣箱は LTE などのネットワーク回線の届かない山地に設置されることも想定されることから，そうした状況下でも測定したデータの定期的な収集を実現する必要がある．

以降では，上記要件を満たすニホンミツバチの巣箱センシングシステムの具体的な実装について詳述する．

3.3 システム概要

本稿では，前述のシステム要件を満たす，エナジーハーベストなニホンミツバチの巣箱センシングシステムを提案する．提案するシステムの概要図を図 2 に示す．システムはセンシングシステム部とエナジーハーベスト駆動のための電源部の二つに分かれる．

センシング部では，要件 3.2 を満たすため，巣箱の環境として「温湿度」，巣の大きさとして「重量」をセンシング対象として設定した．データを送信する際，要件 3.2 で述べたとおり，通信環境が乏しいことが問題となるため，我々は低消費電力で長距離のデータ通信

表 1: センサ一覧とその仕様

名称	型番	仕様
温湿度センサ	DHT11	温度 8 bit 精度 ±2°C （分解能：1°C） 湿度 8 bit 精度：±5% 測定範囲：0 – 50% （分解能：1%RH）
重量センサ	HX711 SC133	測定範囲：0–20kg 精度：0.05%

可能な Sigfox[2]を採用することとした．他の LPWA として，LoRa が存在するが，本システムは日本全国に設置する事が想定されているため，通信範囲が現時点でより広い Sigfox を用いている．

次に電源部では，要件 3.2 を満たすため，太陽光発電による蓄電手法を採用した．エナジーハーベストでは，エネルギー源として，光，熱，振動などが用いられる事が多いが，本研究の巣箱を設置する環境において，最も発電量が多く自然環境でも発電可能なエネルギー源は太陽光であるため，太陽光発電により蓄電する手法を採用した．

表 1 に本システムで使用するセンサの一覧とその使用を示す．本システムでは温度センサに DHT11 を使用し，分解能は 1 °C（精度：± 2 °C）である．また，湿度の分解能は 1%で，精度は± 5%である．

我々の提案する巣箱のセンシングシステムでは，12 分ごと（1 日あたり 120 回[3]）に温湿度と巣の重量を測定し，Sigfox 通信でデータをクラウド上に保存する．送付されたデータは可視化が用意で比較的専門的な技術が不要で扱う事が可能な SpreadSheet に保存することとした．なお，Sigfox では一度に 12 バイトのデータを送付可能であるため，現在は，重量：4byte，内部温度：1byte，内部湿度：1byte，外部温度：1byte， 外部湿度：1byte の合計 8bytes のデータを送付する設計となっている．今後は，照度などの情報も追加する予定である．

一度データを送信した後は，タイマー IC（TPL5111）を用いて，省電力モード（IC 消費電力：35uA）に移行する．そして測定から 12 分後にまた起動しデータを送信する処理を繰り返す．本研究では，制御マイコンのディープスリープ機能によって，省電力で動作させる

[2]Sigfox は，LPWA の通信規格の一つである．1 回最大 12 バイトのデータを送信する際，必ず 3 回のリピテーションを周波数を変えて行う仕組みとなっているため，省電力で長距離通信が可能でありつつ，信頼性も高い．しかし，制限も大きく，一度の通信で送信できるデータ容量は最大 12 バイトまでであり，通信速度は上り 100bps，下りは 600bps と低速である．また，1 日の通信回数の上限が決まっており，上りが 140 回，下りは 4 回までとなっている．

[3]Sigfox の通信回数の制約条件に基づき決定した．

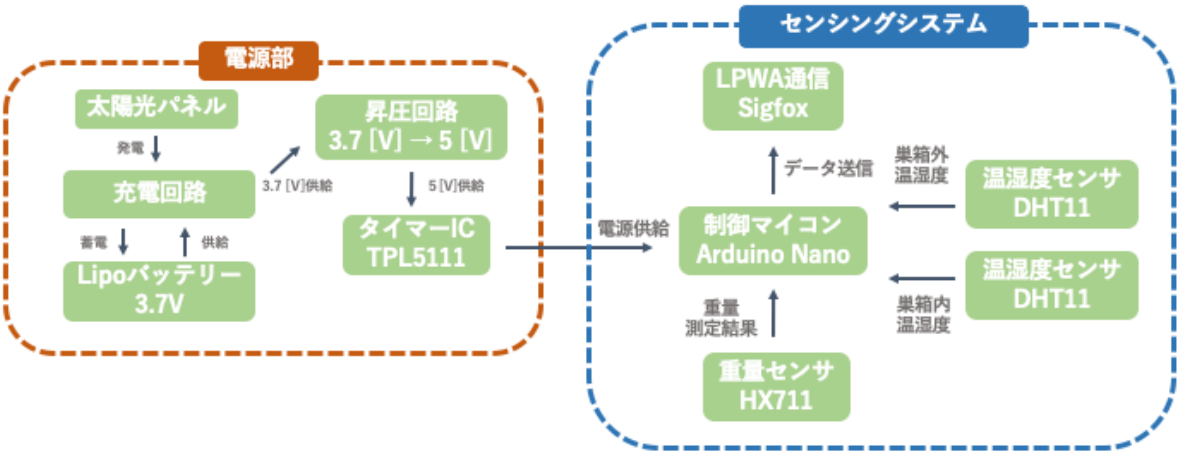

図 2: システム概要図

ことも可能であるが，タイマー IC により，制御を行った．これは，ディープスリープ機能では，他のセンサ回路などへの電源の供給を止めることができないからである．

最後に，センシングシステム部の回路図を図 4 に，それらを量産が容易なプリント基板とした時の配線図を図 5 に示す．また，プリント基板に部品を実装した時の外観図を図 3 に示す．

図 4 の回路図において，Sigfox モジュールとの通信は UART を用いており，温湿度および重量センサは独自の通信規格により通信を行っている．スイッチは，重量センサのキャリブレーション用に取り付けられている．図 5 の配線図では，ノイズ対策のため，ベタ塗りパターン（青の部分）を取り入れており，金属板の面積が広くなっている．しかし，ベタ塗りのデメリットとして，夏場直射日光にさらされると高温になることや冬場温度が低下し，結露になりやすくなる事が考えられる．

4　システムの動作確認実験

本節では，開発したシステムについて，エナジーハーベストの観点から，消費電力，太陽光パネルでの充電，発電なしの状態での継続動作時間を評価した．また，温湿度の測定について実環境での動作確認を行った結果についても述べる．なお，重量センサの動作評価は，設置対象の巣箱にミツバチが住み着いており，ミツバチへの負荷の観点から冬場のシステムの設置が難しいため断念した．同様に温湿度センサの巣箱内部への取り付けも行っておらず，外部 2 箇所のみである．巣箱への温度センサの取り付けは，NPO 法人 ビーフォレスト・クラブ会長：吉川氏指導の下，安全面を配慮して行った．

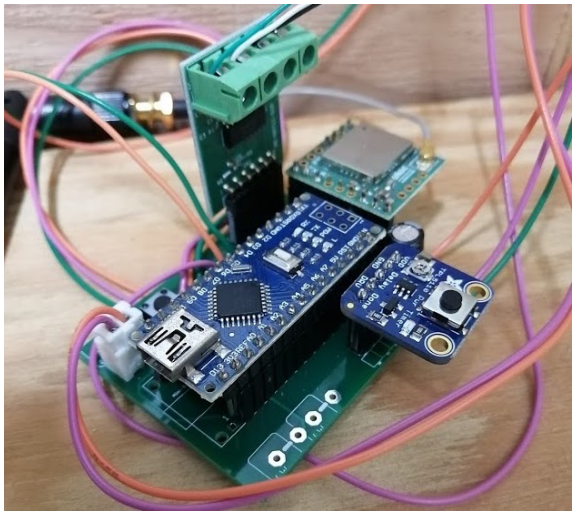

図 3: センシングシステムの外観

4.1　動作に要する消費電力の確認

図 3 に示す作成したデバイスの一回の起動あたりの消費電力の測定を USB 消費電力チェッカー（ITPROTECH 社 KM-04）を用いて行った．

システムを 1 時間駆動し，5 回のデータ送信を行った時の消費電力は 5mAh であった．よって，一回の送信の消費電力は 1mAh と省電力である．また，1 日の消費電力は，120mAh である．

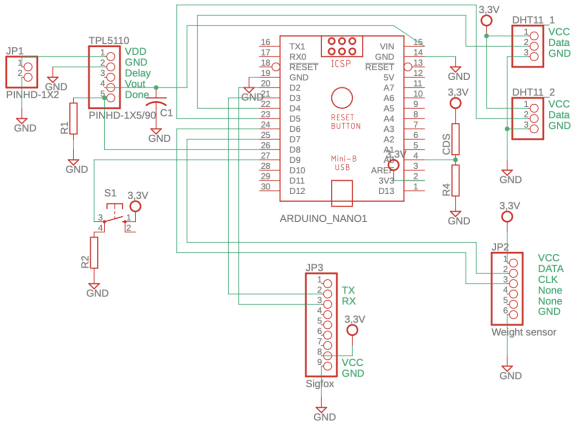

図 4: センシングシステム部の回路図

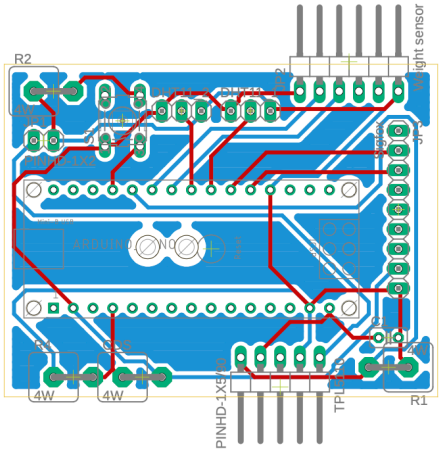

図 5: センシングシステム部のプリント基板の配線図

4.2　太陽光パネルでの充電時間の確認

次に，冬場 11 月の晴れた日の日射量で，システムに搭載されている 1000mAh のバッテリーがどの程度の時間で充電されるかの計測を行った．充電状態の確認は，Lipo バッテリー充電モジュールの充電完了 LED の状態が緑に点灯した時とした．なお太陽光パネルの向きは地面に対して水平の状態で設置した．充電が 0%の状態で夜にデバイスを設置し，晴れの日が続いた時何日目で充電完了 LED が ON になるかを測定した．

実験の結果，開始からの 2 日目の午後に充電が 100%となり，充電が完了されることが確認された．

4.3　充電のない環境での連続動作時間の確認

太陽光発電が期待できない雨の日が続く梅雨の時期に，システムがどの程度の期間充電なしで動作するのかを評価するための実験を行った．太陽光発電パネルを光をが当たらない状態にした状態で，充電 100 %の状態で測定を開始し，何日間センサ情報を測定し，サーバに送信できるかを確認した．実験の結果，855 回のセンサデータの送信が正常に行えることが確認された．これは，約 7 日間と 3 時間，継続動作可能である事を示す．これ以降のデータ送信は，サンプリング周期が一定でなくなり，4 時間後や 3 日後などまばらにデータが記録されている事が確認された．これはバッテリーの蓄電不足が原因により引き起こされる出力電力の制限により，Sigfox 通信での送信が不安定になった事が原因として考えられる．

4.4　収集データに基づくシステム動作分析

実環境での動作確認として，本システムを実際の自然の中に設置された巣箱に設置し，その時の温湿度を測定し，サーバへの送信を記録した．実験期間は，2020 年 11 月 20 日から 2020 年 12 月 12 日までの冬の 3 週間である．温湿度センサは，防水のため，ジップロックにより全体を覆う形で巣箱の側面に設置した．

3 週間の温度の測定結果を図 6 に，湿度の測定結果を図 7 に示す．図 6 に示す温度変化のグラフでは，全体の傾向として，周期的な立ち上がりが確認できる．これは昼間の温度上昇を示している．同様に図 7 に示す湿度変化のグラフでも，日中の定期的な立ち下がりが確認できる．これは温度が上がることによる湿度の低下が起因している．湿度センサの出力が夜間，90%となっているこれは防水のために保護したジップロック内の空気が外気により冷やされることで，湿度が上昇したと考えられる．

12 月 5 日から 12 月 7 日の夜間において，図 6 に示す温度変化のグラフで，温度の測定結果が高頻度で 40 度を超える現象が確認された．これらの測定結果は，巣箱の温度を測定した結果ではなく，急な温度上昇であることから，ノイズであると考えられる．40 度を記録する直前の温度はどれも 4 度程度と低温であり，時間帯も夜間であることから，結露が原因であると考えられる．

5　考察

5.1　エナジーハーベストに関する考察

本システムは，2 日間の充電により，7 日間太陽光発電がない状態でも継続して動作することがわかった．実際の動作では，曇りの場合の少ない発電量（晴れの時の 30%程度と仮定した場合）において，蓄電は期待できないが，システムの動作電力（一回の送信あたり 1mAh）をそこから回収することは十分可能であると考えられ

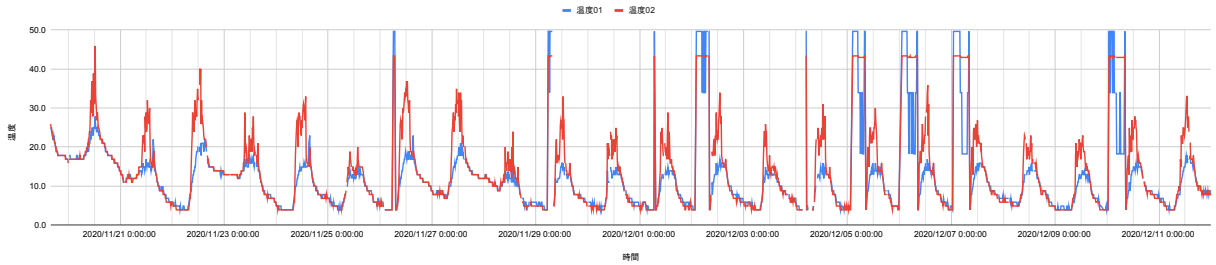

図 6: 3 週間の温度の測定結果

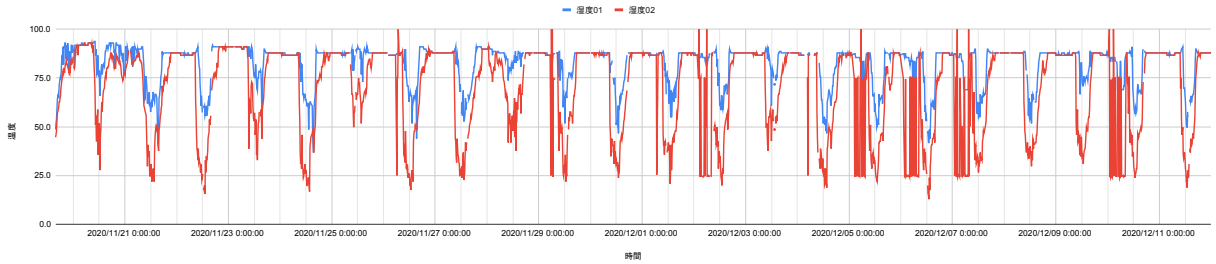

図 7: 3 週間の湿度の測定結果

る．また，本システムでは 1000mAh のバッテリーを使用したが，大容量のものに変えることで，より安定で継続的な動作が可能になると考えられる．

5.2　量産にむけた製造コスト削減方法の検討

巣箱センシングシステムは，多数の巣箱に設置し同時並行的なデータ収集を行うことで，環境条件を明らかにするため，システムを安価に構築することも重要な要素となる．

そこで，本稿で構築したシステムの部品の一覧とそれぞれの費用を表 2 にまとめた．合計費用は約 1 万円であり，ここに製造コストが追加される．本システムは最終的に 100 台程度量産し，巣箱に取り付けることを想定している．

表 2 からわかるように，Sigfox モジュールのコストが 5000 円と大きくなっている．しかし，この金額には，915MHz のアンテナ（相場 1000 円程度）と 1 年間の通信費用（1500 円）が含まれている．この部分を自作し，プリント基板に埋め込むことも可能であるが，Sigfox の IC が 1000 円程度かかることやプリント基板製造代金が 500 円程度増加することを考えると，実質 1000 円分しか削減できないため，得策ではない．

バッテリー部分に関しては，太陽光パネル，Lipo バッテリーとその充電回路で 1500 円程度かかっているが，この部分は保護回路であるポリヒューズなどの取り付けなど，手間がかかっているため，モバイルバッテリーの方が手間が少なくなると考えられる．

表 2: システム構築に必要な部品の一覧と費用

項目	費用（円）
Arduino Nano 互換品	500
Sigfox モジュール	5,000
タイマーモジュール	1,000
温湿度センサ	500
重量センサ	800
プリント基板	500
太陽光パネル	500
バッテリー	500
バッテリー充電回路	200
昇圧回路	300
合計	**9,600**

6　まとめ

本研究では，ミツバチ の巣箱の営巣の活発化を目標に，巣箱内外の温湿度および巣の重量のセンシングを行い，LPWA を用いてデータを収集するエナジーハーベスト駆動のシステムを提案した．評価実験の結果，一回の送信あたり，1mAh と省電力であり，太陽の光が弱い冬場の 2 日間の太陽光で充電を完了させ，1 週間継続して動作可能である事を確認した．2020 年冬季の

3 週間，実際に自然環境に設置されている巣箱にシステムを取り付け，温湿度の測定を行った結果，継続的に動作する事が確認された．しかし，夜間の結露によるノイズの発生が確認されたため，今後改善が必要である．

今後，本システムを量産するにあたり，製造簡易化のための部品点数の削減や，デバイスの製作コストの削減のためのシステムの見直しが必要となる．また，回路基板の製作に関して，部品実装による製作の効率化が必要である．また，基板内で使用するモジュールが現在，5V 系列と 3.3V 系列が混在しているため，省電力化および昇圧モジュールの削減を目標に，3.3V 系列に統一する予定である．

参考文献

[1] 吉川浩. ミツバチおじさんの森づくり -日本ミツバチから学ぶ自然の仕組みと生き方. ライトワーカー, 2019.

[2] C von Frisch. The tail-wagging dance as a means of communication when food sources are distant. *The dance language and orientation of bees*, pp. 57–235, 1967.

[3] 高橋伸弥, 橋本浩二, 前田佐嘉志, 鶴田直之, 藍浩之. ミツバチコロニーの巣内行動観察システムの開発. 人工知能学会論文誌, Vol. 32, No. 4, pp. B–GC2_1, 2017.

[4] M. Sugahara, T. Yamamoto, and Y. Kishino. Microenvironment maintenance mechanism (temperature and relative humidity) of the brood area in an artificial open nest of apis cerana japonica. *The 87th Annual Meeting of the Zoological Society of Japan*, 2016.