スマート都市養蜂に向けた省電力センサの開発

佐藤証 [1]

概要：スマート都市養蜂システムの実用化に向け，遠隔管理が可能で無線通信機能を備えた省電力センサモジュールを開発した．待機中に制御用のプロセッサを低消費電力の Deep Sleep モードで待機させ，周辺回路への給電を遮断することで，3 本の単 4 乾電池で 5 ヶ月の動作を実現した．同時接続数が 10 台のモバイルルータでも，通信を順次切り替えながら 40 台の接続を確認し，数千台の接続も可能であると試算している．養蜂場の巣箱に設置したセンサの重量変化から，春の採蜜や秋冬には給餌のタイミングを計ることができる．また，温度センサでは女王バチが半数の働きバチと共に巣を離れる分蜂の際の体温上昇が確認された．重量の急激な低下および別途設置していたスズメバチ検知カメラの映像と合わせて分蜂の発生を即座に確認し対処できたことなど，システムの実用性が示された．

Development of Low-Power Sensor for Smart Urban Beekeeping

AKASHI SATOH [1]

1. 養蜂をめぐる情勢

ミツバチは農作物の受粉になくてはならない生き物で，アインシュタインは「もしこの地球上からハチが消えたなら、人類は 4 年しか生きられない」と語ったと言われている．生物多様性及び生態系サービスに関する政府間科学－政策プラットフォーム IPBES は 2016 年の報告書[1]の中で，世界の農作物の 75%と野生植物の 90%の受粉はミツバチを主とする花粉媒介生物によって行われ，その経済効果は 2015 年に 2,350～5,770 億ドル/年に相当すると試算している．また，小沼らは国内の花粉媒介生物による経済効果を 4,700 億円，そのうちの約 1,400 億円が飼育されているミツバチ等，約 3,300 億円が野生の花粉媒介生物によるものと試算している[2].

図 1 は国際連合食糧農業機関 FAO による世界で飼育されている養蜂群数の 1961~2017 年の推移である．世界の合計数では増加しているが，これはその 3 割を占める中国とトルコが大きく伸びているためである．その一方で，日本と米国は急速に減少して停滞，欧州も大きく減少した後に元の水準にまでは戻っていない．これらは人が飼育しているミツバチの数であるが，野生の昆虫は 30 年あまりで 1/4 に激減していると言われ，世界的に深刻な問題となっている[3]．その原因は世界的な気候変動，都市化や農地化よる生息地の現象，殺虫剤や肥料の使用[4]等である．

農林水産省は，花粉交配用蜜蜂の安定確保を図るため，養蜂等振興強化推進事業[5]による支援やミツバチの需給調整システムの整備を行っている．これは地方の農産地や施設園芸を主な対象としたものであるが，都市農業における路地物野菜や家庭菜園においてもミツバチが不可欠であることには変わりない．

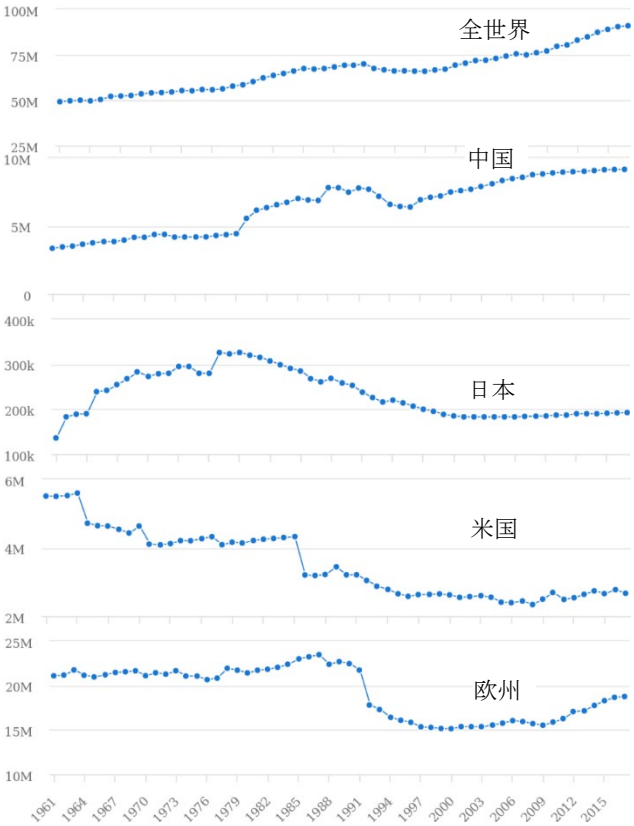

図 1 世界の養蜂群の数（出典: FAOSTAT）

1 電気通信大学
University of Electro-Communications

© 2022 Information Processing Society of Japan

2. 新たな都市養蜂

採蜜や農作物の受粉を目的とした養蜂に対して，ビルの屋上等を利用した都市養蜂が，昨今の環境への関心の高まりとSDGs の浸透により，地域コミュニティ活動として広まっている．養蜂は個人でも行える唯一の畜産業と言えるが，養蜂家の勘と経験が頼りであるため，新規に始める際の敷居は非常に高いのが実情である．農業は IoT 技術の導入で新規参入が進んでいるが，養蜂は 1860 年に米国の Langstroth が特許を取得した図 2 の養蜂箱が現在も使われており，大きな進歩は 160 年以上見られていない．ミツバチの健康状態のチェックには，蓋を開けて巣枠を調べる内検が欠かせないが，これはミツバチにとって大きなストレスである．内検は雨天以外の日中しかできないが，ハチは夜間も，巣作り，育児，蜜の濃縮等を行っている．また，養蜂での最大のトラブルは，新しい女王の誕生に伴って群の半分が巣箱を出ていく分蜂であり，採蜜量が激減するだけでなく，街中に現れた大群のミツバチがニュースとなって世間を騒がせることもある．したがって，巣箱の状態を遠隔で 24 時間モニタできれば，ミツバチの健康管理とトラブルへの迅速な対応が可能となる．

これまでの養蜂の研究はミツバチの生態に関するものであったが，近年 IoT 化に関する論文発表が続いている[6]-[19]．しかし，研究用の専用の巣箱や装置を用いたものや，市販のマイコンボードで組み上げたプロトタイプ，またコンセプトの提案など，一般の養蜂家が気軽に使用できるものではない．また国内では，温湿度を測定する製品が一社から販売されているに過ぎない[20]．

そこで本研究では，IoT 技術を誰でも簡単に利用できるように，小型で安価なセンサモジュールと，センサのデータをスマートフォンで遠隔モニタ可能な養蜂システムを開発した．そして，それらを養蜂施設に設置して運用実験を行った．

図 2　Langstroth 養蜂箱の内検の様子

3. 試作養蜂センサ

図 3 は ESP32-WROOM-32（以下 ESP32）[21]を実装した市販の青いマイコン基板 ESP32-mini を用いて試作した，養蜂用の温湿度センサモジュール（左）および重量センサモジュール（右）である．左図の赤い基板は温湿度センサ HTU21D[22]，右図の緑の基板は重量センサ用 AD コンバータ HX711[23]である．温湿度センサモジュールは厚さ 6.5mm のタブレット菓子のケースに収めて micro USB ポートに 5V モバイルバッテリ（容量 3,400mAh の 3.7V リチウムイオン電池を昇圧）を接続して使用し，重量センサモジュールは市販の体重計の筐体とロードセルをそのまま利用して単 4 アルカリ乾電池×3 本で駆動した．これらの ESP32 を Deep Sleep モードで 1 時間に一回起動させ，Wi-Fi で測定データを送信するオペレーションを繰り返したところ，いずれも 2 週間弱でバッテリを消費してしまった．

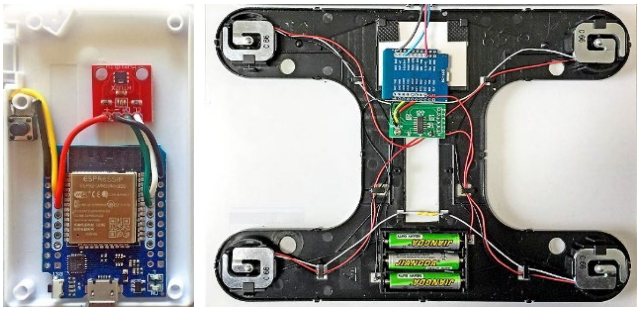

図 3　市販の ESP32 マイコン基板を用いた温湿度センサモジュール（左）と重量センサモジュール（右）

通信が良好な場合に，起動からデータを送信して再び Deep Sleep モードに入る時間は 4 秒程度であった．Wi-Fi 送信時に実測値で 133mA と最も大きな電流が消費され，Deep Sleep 時は 11.6mA であった．ESP32 の動作電圧は 3.3V，リチウムイオン電池の電圧は定格 3.7V で，これを 5V に昇圧の後に ESP32 mini 内で 3.3V に降圧している．変換のロス等もあるので単純化し，また Deep Sleep 時以外の 4 秒間の測定・通信の処理に必要な電流も無視し，3,400mAh のバッテリに 11.6mA の電流が流れ続けたと仮定すると動作日数は，3.400mAh/11.6mA=293.1h=12.2 日となり，上記の 2 週間弱と一致する結果である．しかし ESP32 のデータシートによると Deep Sleep 時の電流は 0.15mA となっているので，100 倍近くもどこかで消費されていることになる．

そこで Deep Sleep 時に大きな電流を消費している IC チップを調べたところ，まず USB-Serial 変換 CP2012[24]であることが判明した．CP2012 は通信が途絶えると数秒後に低消費電力のスタンバイ・モードに移行する．しかし，接続先が PC ではなくバッテリのため通信ラインが未接続で，通常モードのままデータの待ち受け状態となってしまっていた．そこで，ESP32 mini の USB ポートを PC に接続して ESP32 を Deep Sleep モードに，CP2012 をスタンバイモードに入れたところ消費電流は 4.5mA に下がった．しかし，これでもまだ Deep Sleep 時の ESP32 の電流の 30 倍もある．さらに調べると，3.3V レギュレータ ASM1117[25]のデータシートに，無負荷状態で消費される自己消費電流（Quiescent Current）が標準で 5mA とあり，これが原因であることが分かった．

市販の基板では ESP32 mini のように小型かつ，Deep

© 2022 Information Processing Society of Japan

Sleep モードでバッテリ長期駆動できるものがなく，また，図 3 のように温湿度センサや AD コンバータ，そしてスイッチ等の配線の手間もかかる．そこで，レギュレータに低消費電力の物を使用し，かつバッテリ使用時に USB チップに電力が供給されないオリジナルの養蜂センサ基板を作成することとした．

4. 省電力養蜂センサ

図 4 に自己消費電流が 0.025 mA の電圧レギュレータ TLV75533PDBVR[26]を用いて製作した，オリジナルの省電力養蜂センサを示す．左の初版モデルでは 2 極の DIP スイッチの 1 極を使い，バッテリ使用時には USB チップ CP2012 への電力供給を切替えている．なお，もう一方の極は Wi-Fi の通信モードの切り替えに使用している．Rev.1 では部品点数の削減によりコスト低減と小型･省電力化を進めた．Rev.2 は USB チップを CH340E[27]へ変更し，バッテリ駆動時は DIP スイッチでの切替えではなく，図 5 のようにショットキーバリアダイオードで，USB チップに電流が流れるのを防ぐ構成とした．これにより DIP スイッチを 1 極に変更し，さらに部品点数も削減した．Rev.2.2 は Rev.2 と回路構成は同じであるが，半導体部品不足により，スイッチ，USB コネクタ，ダイオード等のメインでないパーツの多くを変更している．基板の色の違いに大きな意味はない．

表 1 に各センサと，図 3 の試作センサモジュールで使用した ESP32 mini の基板サイズを示す．オリジナル基板は温度センサ用の回路と重量センサ用 AD コンバータ HX711，そして小型 MEMS マイク ICS-43432[28]も実装しているが，ESP32 mini に対して Rev.2.2 はわずかに横に 3mm，縦に 8mm 長いだけで済んでいる．

表 1 基板サイズ

バージョン	サイズ(mm)
初版	33.1×53.7
Rev.1	33.1×48.7
Rev.2	33.1×45.3
Rev.2.2	33.0×46.0
ESP32 mini	30.0×38.0

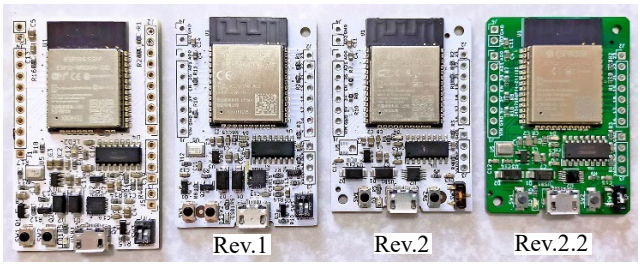

図 4 オリジナルの省電力養蜂センサ

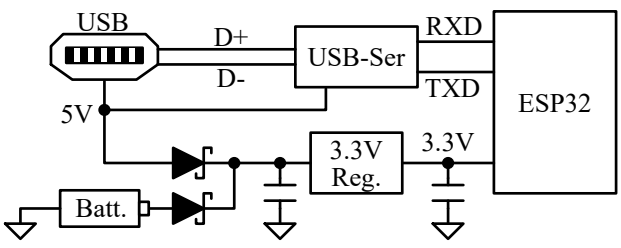

図 5 養蜂センサ Rev.2 の電源回路

図 6 の養蜂センサ Rev.2.2 を，温湿度センサモジュールとして電池ボックスに組み込んだものを図 7 に，重量センサモジュールとして体重計内に組み込んだものを図 8 に示す．図 7 では青い基板の温湿度センサ AHT21[29]を，ピンヘッダ部に外付けしている．これは湿度センサを屋外で使用すると短期間で値がおかしくなることが多かったため，オリジナル基板上には載せずに簡単に交換できるようにしたものである．また図 8 の重量センサモジュールは，図 3 と同じ体重計の筐体とロードセルを使用している．両者とも単 4 アルカリ乾電池×3 本で動作する．

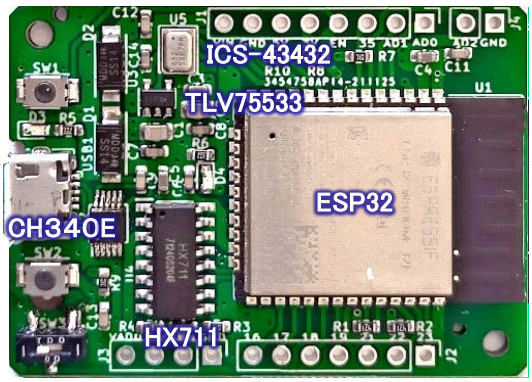

図 6 オリジナルの省電力養蜂センサ

図 7 電池ボックスに組み込んだ温湿度測定用養蜂センサ

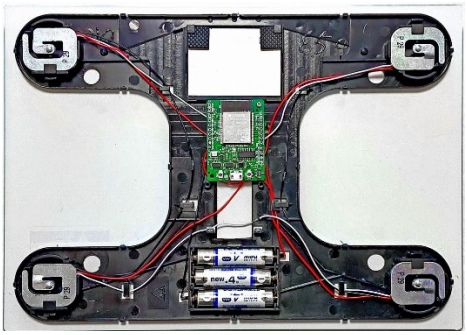

図 8 体重計に組み込んだ重量測定用養蜂センサ

図 9 は養蜂箱内に設置した図 3 左の試作の温湿度センサの様子である．ミツバチの体温を測定するために，ハチが活動している巣枠の間に縦 78mm×横 47mm×厚み 6.5mm のケースを差し込んでいたが，ケースの両側の巣脾が使えなくなってしまう問題があった．そこ図 7 の新センサでは，温度測定に細長いケーブルのサーミスタ（10kΩ, B 値 3950）を用い，図 10 のように巣枠の間に差し込むようにした．データの測定は ESP32 の ADC に，電源電圧 3.3V をサーミス

© 2022 Information Processing Society of Japan

タと 10kΩの抵抗で分圧して入力している．ハチの体温は巣枠の間で測定する必要があるが，湿度は箱内の他の場所でもよいため，電池ボックスに図 7 のように複数の通気口を開けて AHT21 で測定している．

図 10 は図 8 の重量センサモジュールを養蜂箱の下に置いて，群勢や貯蜜量の変動を測定している養蜂施設の様子である．養蜂箱の片側の足を載せており，およそ半分の重量だけがかかるため，実際の重さは測定値の約 2 倍にする必要がある[30]．Wi-Fi ルータの停止により，養蜂センサが接続のリトライが何度もかけるということもあったが，この重量センサのバッテリによる連続稼働日数は 153 日と，試作センサの 10 倍以上の性能が得られた．

図 9　養蜂箱内に設置した試作温湿度センサ

図 10　養蜂箱内に設置した新温湿度センサモジュール

図 10　養蜂箱に設置した新重量センサモジュール

オリジナル養蜂センサは，図 11 に示した小型の MEMS マイクで取得した音声を，Wi-Fi や Bluetooth を経由して WAV 形式の音声ファイルとして保存する機能を実装している．温湿度や重量は養蜂箱全体の平均化した変動の緩やかな情報であるが，巣箱の状態変化をリアルタイムで検知するには，振動でコミュニケーションをとるミツバチの発する音声が有用であると考えられる．図 12 は MEMS マイクで取得したハチの羽音の時間波形で，図 13 はネットで取得した女王バチの特徴的な鳴き声を周波数スペクトルとして時間軸でプロットしたものである．温湿度や重量のデータ量は非常に小さいが音声データは比較的大きいため，バッテリでの長時間稼働の実現や，音声データから有意な情報の抽出が今後の課題である．

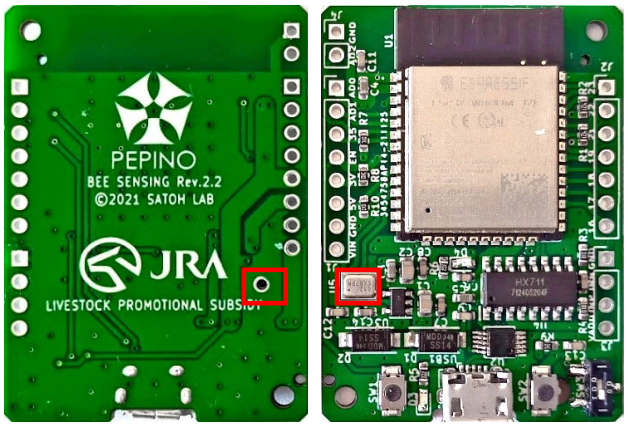

図 11　養蜂センサ Rev2.2 の MEMS マイク

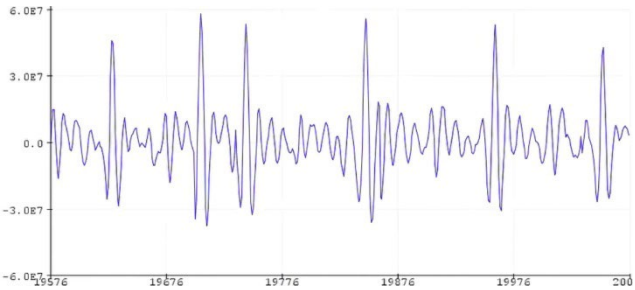

図 12　MEMS マイクで取得したミツバチの羽音の時間波形

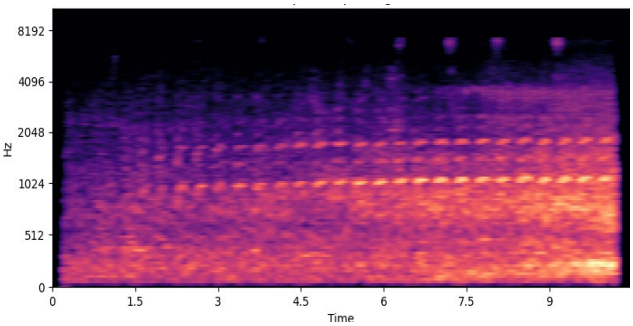

図 13　女王バチの鳴き声の周波数スペクトル表示

5.　スマート養蜂箱

養蜂センサモジュールはバッテリ駆動可能であるが，ルータは電力消費量が大きいため別途電源を確保する必要がある．しかし，都市であってもビルの屋上には電源のないところが少なくない．そこで，図 14 のようにソーラーパネルを蓋に取り付け，裏側にモバイルルータと，充電と給電が同時に行えるパススルータイプの大容量モバイルバッテリを備えた養蜂箱を製作した．また，図 15 のように花の少ない時期にミツバチに糖液を与える給餌枠に，図 7 の温湿度センサと，糖液の消費量を測定するレーザー距離センサ

© 2022 Information Processing Society of Japan

VL53L0X[31]を実装した．なお図 15 では，構造がわかるように前面のカバーを全て外している．

図 13　ソーラーパネルとモバイルバッテリによるルータの駆動

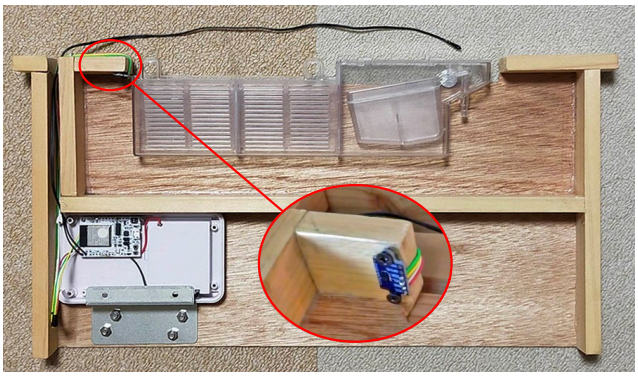

図 14　センサを取り付けた給餌器

複数群を飼育する場合，給餌枠のセンサは各養蜂箱に必要であるが，ソーラーパネルとモバイルルータは各箱で共有することができる．しかしルータの接続デバイス数は 10 程度で，5 箱の飼育でも温湿度と重量センサで 10 デバイスとなり，それ以上増やすことができなくなってしまう．また業としての養蜂での利用も考慮すると，100 台以上のセンサモジュールにも対応したい．そこで，データの送信が完了したセンサの接続を切って Deep Sleep モードに入れ，センサを順次接続するという手法を実装することとした．

各センサはおよそ 1 時間に 1 回データを送信するようにしている．良好な通信下で一連の処理（Deep Sleep モード→起動→Wi-Fi 接続→センサデータ送信→サーバの Ack 受信→Wi-Fi 切断→Deep Sleep モード）に要する時間は 4 秒程度である．既にルータが 10 台と通信中などで，5 秒以内に Wi-Fi 接続できなかった場合は，それ以上何もせずに Deep Sleep モードに入る．Wi-Fi 接続に成功したセンサは 1 時間後に起動させるが，失敗したものも 1 時間後に起動させると，再びルータがビジーで接続できない可能性が高い．そこで，1 時間のインターバル内のランダムなタイミングで接続を試み，成功したならばその後は 1 時間毎に再接続とデータ送信を行うようにした．

図 15 に温湿度センサと重量センサ各 20 台の計 40 台のデバイスを，1 つのモバイルルータに接続する実験の様子を示す．図 16 は Raspberry Pi サーバが受信したデータのうち，重量と温度をデータ可視化ツール Grafana [32]で表示した画面である．最新データが画面左側に，過去 6 時間のデータが時系列で右側に示されている．重量センサは 10 台ずつ縦に積んでいるため，1 段上がるごとにセンサデータは約 1kg 軽くなっている．電源投入は 20 秒以内に，20 台の重量センサ，そして 20 台の温湿度センサと行ったが，Wi-Fi 接続失敗時の復帰のスケジューリングがうまく働き，全てのセンサが正常に接続されていることがわかる．

図 15　ルータへの 40 台のセンサ接続

重量グラフの右側では，1 段目と 2 段目の 10 台に対して 1 時間おきに 1 本ずつのデータが現れているように見えるが，同時に接続されたセンサのデータ 5 本が重なってそれぞれ表示されている．つまり，最初に電源を投入した 10 台は，すぐに接続できてたことを意味する．3 段目では 1 時間に 3 本の線が見えるが，5 台のセンサのうちの 2 台が初期接続に失敗し，ランダムな時刻に再接続をおこなった結果である．その後，最初の 10 台の重量センサが処理を完了して Deep Sleep モードに入ったため，4 段目の 5 台，そしてそれに続く温湿度センサのグラフの 1 段目でも初期接続に成功している．電源を後から入れた温湿度センサは初期

図 16　Grafana による重量（左）と温度（右）のデータ表示

© 2022 Information Processing Society of Japan

接続に失敗する可能性が高いため，重量センサよりもグラフがばらけていることがわかる．

この手法で，10 台同時接続できるルータに， Deep Sleep モードのインターバルを 1 時間としたときに接続可能なセンサの台数を考える．通信が良好な状態では，起動からデータ送信の一連の処理に約 4 秒を要するが，平均で 6 秒を要したとしても，1 分間に 60 秒÷6 秒×10 台=100 台が接続できる．60 分のインターバルであれば理想的には，100 台/分×60 分=6,000 台ものセンサが 1 つのルータに繋がることになり，養蜂業においても十分な性能である．

6. 管理システムと運用

図 17 に管理システムの全体構成を示す．養蜂施設に設置したセンサで取得したデータはモバイルルータを介して，IoT 向けの軽量通信プロトコル MQTT によりインターネット経由で Raspberry Pi サーバに送信される．サーバ上には，MQTT サーバ Mosquitto [33]，フローベースのプログラミング環境 Node-RED [34]，時系列データベース InfluxDB [35]，データ可視化ツール Grafana [32]，そしてオープンソースのスマートホームプラットホーム Home Assistant [36] 等を実装した．図 18 の Node-RED の管理フローは，センサデータから図 19 のダッシュボードのグラフを生成し，スマートフォン等で遠隔モニタが可能である．またセンサデータは InfluxDB データベースにも保存され，図 16 でも示した Grafana の様々な描画機能を用いて，後から解析することもできる．

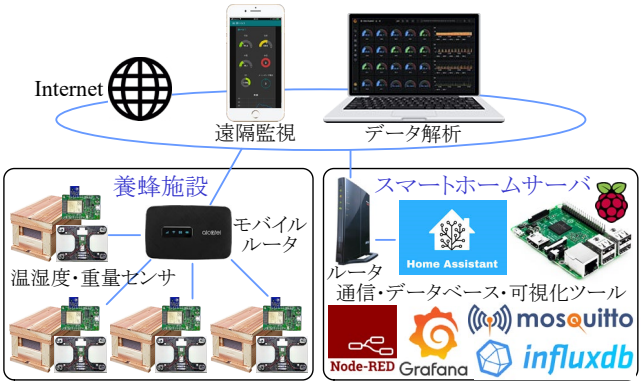

図 17　管理システムの構成

図 18 のフロー図で，養蜂センサ“BEE”からのデータは左上の紫のボックスの入力ノードで受信され，黄色のセレクタでセンサごとに分けられ，右側の水色の出力ノードを通じてダッシュボード上に表示される．左側の薄い水色のノードは，重量センサのこうせい作業校正や Deep Sleep モード制御などを行うダッシュボードのスイッチ類である．肌色のノードはデータ処理のファンクションノードで，薄茶色のノードではファイル操作が行われる．下 2 行のフローは，MEMS マイクで取得した音声データを受信して，WAV ファイルとして保存する．

2 章で述べたように，ハチの数が半分になる分蜂は採蜜量が半減するだけでなく，ハチの集団が街中に現れて騒ぎ

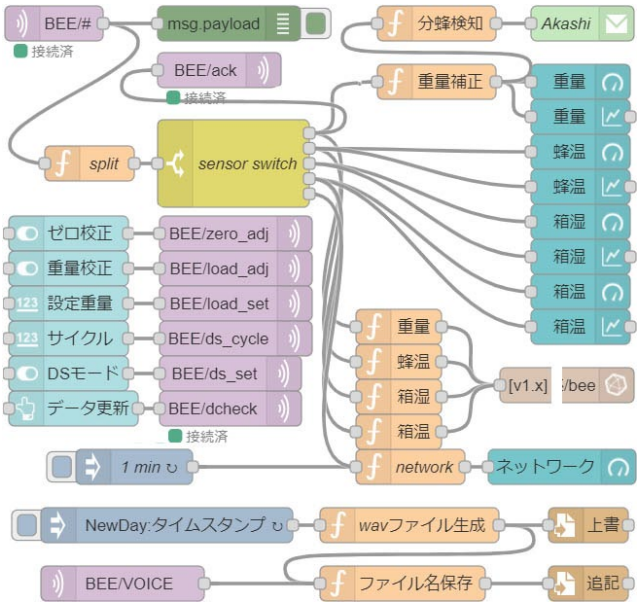

図 18　Node-RED の管理フロー

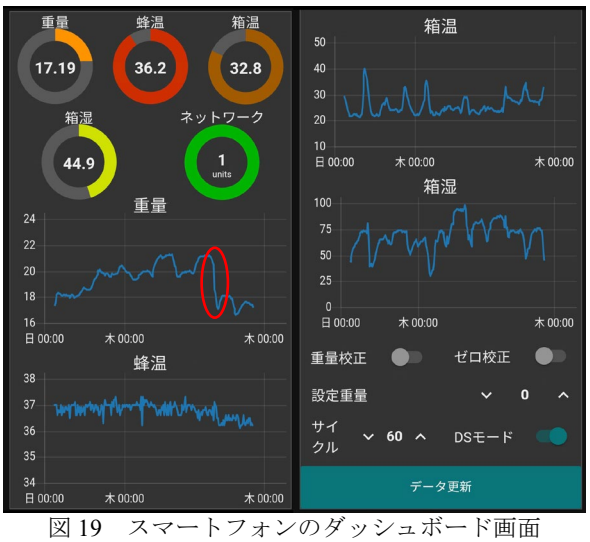

図 19　スマートフォンのダッシュボード画面

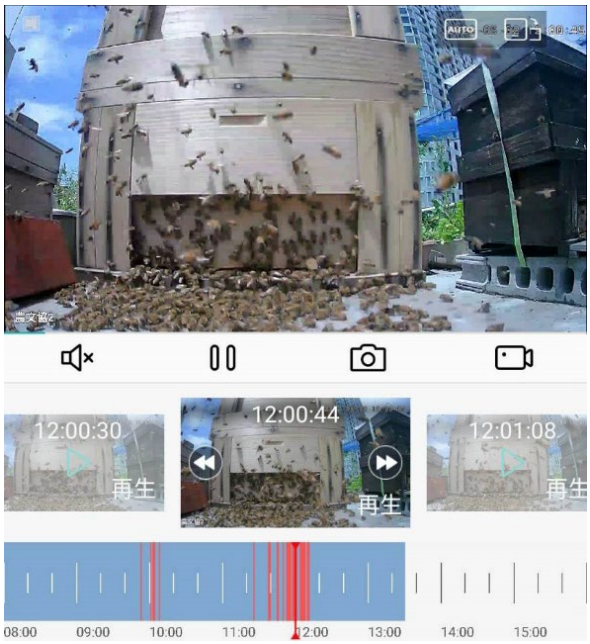

図 20　監視カメラによる動体検知

© 2022 Information Processing Society of Japan

になることもあり，都市養蜂における最大の懸念事項である．通常は分蜂を起こさないように飼育するが，運悪く始まってしまったならばすぐに適切な対応をとる必要がある．右上の“分蜂検知”と書かれたファンクションノードは，重量が急激に落ちたときに分蜂が始まったことを，薄緑色のノードを通じてユーザにメールで通知する．

図 19 は 4 月 25 日~5 月 4 日の 10 日間の各データを示であるが，5 月 2 日の 12 時前から 1 時間の間に，赤線で囲った部分の約 3kg（その後 4kg まで）重量低下を観測し，分蜂の発生が検知された．それ以前のグラフでは，蜜と蜂群が増えることでグラフは右肩上がりとなっている．一日の中では夜中から昼前くらいまでは落ちているが，これはハチが貯蔵した蜜を羽で扇いで水分を飛ばしたり，日が昇ると蜜を集めに巣を出て行くためである．それらによる重量の減少は，分蜂のときほど急峻ではないので区別が可能である．なお，分蜂の 2 日前にも重量が 1kg ほど落ちているが，これは内検を行った際の巣枠の入れ替えによるものである．

また，ハチの通常の体温は 35~36℃程度であるが，図 19 左下の蜂温のグラフでは分蜂前までは 37℃付近にあり，これは予兆として体温が上昇する“分蜂熱”と見られていた．そこで分蜂が起こらないように女王バチの繭を適宜除去していたが，取り残しにより晴天の日の 5 月 2 日に新女王が誕生し，分蜂が始まってしまった．なお，管理システムが重量の異常を検知するのと同時に，施設に設置している監視カメラでも図 20 のように分蜂が確認されたため，現地に赴いて分蜂群を捕獲することができた．

この監視カメラは日々の状態を遠隔監視だけでなく，ミツバチの最大の敵であるスズメバチの襲来を AI で検知するために設置していたものである[37]．図 20 のように巣箱から続々と飛び出していくハチの映像がとらえられており，また動体検知機能により下部の赤い線のアラートも出ていた．この動体検知は映像のフレーム差分を調べているため，10 時前に多くのハチが蜜を集めに出て行くときにもアラートが発生している．また群がさらに大きくなると，分蜂でなくとも巣箱前に溢れるため，このアラートだけで分蜂を判断することは難しく，重量や体温と合わせて判断する必要がある．

5 月 2 日の分蜂後，ハチの体温は 37℃前後から 35~36℃程度に落ちついていた．ところが 5 月 6 日の午前 10 時に 2 回目の分蜂始まった．図 21 のように重量は 1 時間に 1kg 弱しか減少しなかったが，体温が 37.8℃に急上昇したことで異常を検知することができた．このように，分蜂は予兆なしに突然始まることもあり，分蜂のデータはまだまだ不足している．それらのデータ収集を進め，映像および重量・体温変化と合わせたより精度の高い分蜂の検知，そして予知について検討していく必要がある．

7. むすび

都市養蜂のすそ野を広げるために IoT 技術を導入し，無線通信機能により遠隔管理が可能な小型の省電力センサモジュールを開発し，養蜂施設においてその有用性を検証した．消費電力を削減するためにモジュール上の回路の動作を解析して改良を進め，また制御用プロセッサ ESP32 の Wi-Fi 接続と Deep Sleep モードのスケジューリングを工夫することにより，単 4 アルカリ乾電池×3 本で 153 日の動作を実現した．また，最大接続数が 10 台のモバイルルータでも 40 台のセンサの接続を確認し，6,000 台の接続も可能であると試算している．

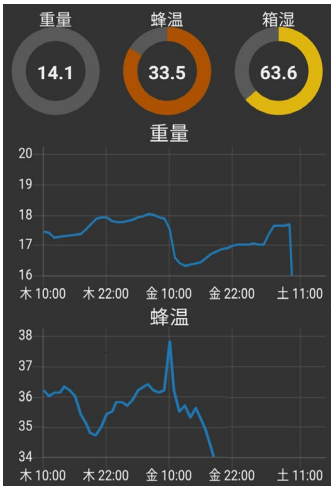

図 21　2 回目の分蜂

養蜂箱に設置した温湿度および重量センサでは，分蜂による通常よりも高いハチの体温と急激な重量の減少が観測された．また監視カメラの映像も確認することで，分蜂発生後すぐに巣箱から出てきた蜂群を捕獲することができた．さらに重量の日々の変化からは，採蜜や給餌の適切なタイミングを計ることができるという高いユーザ評価も得ている．養蜂業において昨今，熊による被害[38]や養蜂箱の盗難[39]が大きな問題となっているが，重量センサによる遠隔モニタで，それらの発生を検知することも可能である．

電源にはソーラーパネルを利用できるが，携帯電話は草原や山間部だけでなく都市のビルの屋上でも入らないことがあり，そのような場所での通信の確保がシステムの課題となっている．IoT 向けの通信規格 LoRa (Long Range) [40]は，低電力長距離無線方式 LPWA (Low Power Wide Area) の一種で，見通しの良い環境であれば数 10km，市街地でも数 km の通信が可能である．商業サービスの LoRa WAN も始まっているが，まだエリアが限られている．そこで，同方式によるローカル通信の Private LoRa をサポートした Arduino 互換モジュール MKR WAN 1310 [40] を用いた図 21 のセンサも試作している．商業サービスのような高い場所の基地局を持たないが，河川敷の比較的見通しが良い場所での実験では，約 2km の通信に成功した．Private LoRa で携帯電波の入る場所まで通信をホップするシステムを構築することで，今後さらに利用の範囲を広げていきたい．

© 2022 Information Processing Society of Japan

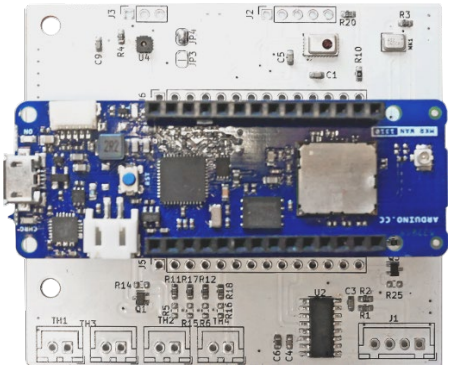

図 21　LoRa モジュールを実装した試作センサ

参考文献

[1] Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES): The Assessment Report on Pollinators, Pollination and Food Production, ISBN: 978-92-807-3567-3, 2016, 入手先 <https://ipb6net/assessment-reports/pollinators> (参照 2022-05-01).

[2] 小沼明弘, 大久保悟: 日本における送粉サービスの価値評価, 日本生態学会誌, vol.65, no.3, pp.217-226, 2015 年 11 月.

[3] G-SCIENCE: G-SCIENCE ACADEMIES STATEMENT 2020 Global Insect Declines and the Potential Erosion of Vital Ecosystem Services, May 2020, 入手先 <https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-24-gs2020-4.pdf> (参照 2022-05-01)

[4] 環境省 中央環境審議会: 生活環境動植物に係る農薬登録基準の設定について（第二次答申）令和 2 年 6 月 26 日, 入手先 <https://www.env.go.jp/press/108134.html> (参照 2022-05-01).

[5] 農林水産省:「花粉交配用蜜蜂の安定確保のための体制整備について」（平成 28 年 8 月 12 日付け 28 生産第 862 号生産局園芸作物課長、28 生畜第 648 号生産局畜産部畜産振興課長連名通知）, 入手先 <https://www.maff.go.jp/j/chikusan/gijutu/mitubati/attach/pdf/index-24.pdf> (参照 2022-05-01).

[6] D. Mrozek, R. Górny, A. Wachowicz, and B. Małysiak-Mrozek, Edge-Based Detection of Varroosis in Beehives with IoT Devices with Emedded and TPU-Accelerated Machine Learning, Applied Sciences, vol. 11, pp. 11078, Dec. 2021.

[7] G. Voudiotis, S. Kontogiannis, and C. Pikridas: Proposed Smart Monitoring System for the Detection of Bee Swarming, Inventions, vol. 6, pp. 87, Nov. 2021.

[8] R. Tashakkori, A. Hamza, and M. Crawford: Beemon: An IoT-based beehive monitoring system, Computers and Electronics in Agriculture, vol. 190, pp. 106427, Sep. 2021.

[9] C. Kady, A. Chedid, I. Kortbawi, C. Yaacoub, A. Akl, N. Daclin, F. Trousset, F. Pfister, and G. Zacharewicz: IoT-Driven Workflows for Risk Management and Control of Beehives, Diversity 2021, Vol.13, No.7, Jun. 2021.

[10] N. Anuar, M. Yunus, M. Baharudin, S. Ibrahim, and S. Sahlan: Embedded Wireless Stinyougless Beehive Monitoring And Data Management System, Proc. 2021 IEEE International Conference in Power Engineering Application (ICPEA 2021), pp. 149-154, Mar. 2021.

[11] N. Bumanis, O. Komasilova, V. Komasilovs, A. Kviesis, and A. Zacepins: Application of Data Layering in Precision Beekeeping: The Concept, Proc. 2020 IEEE 14th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT 2020), pp. 1-6, Oct. 2020.

[12] S. Cecchi, S. Spinsante, A. Terenzi, and S. Orcioni: A Smart Sensor-Based Measurement System for Advanced Bee Hive Monitoring, Sensors Special Issue "Metrology for Agriculture and Forestry 2019", Vol 20, No. 9, 2726, May 2020.

[13] I. Ochoa, S. Gutierrez, F. Rodríguez: Internet of Things: Low Cost Monitoring BeeHive System using Wireless Sensor Network, Proc. 2019 IEEE International Conference on Engineering Veracruz (ICEV 2019), vol. I, pp. 1-7, Dec. 2019.

[14] A. Koning: IndusBee 4.0 – Integrated Intelligent Sensory Systems for Advanced Bee Hive Instrumentation and Hive Keepers' Assistance Systems, Sensors & Transducers Journal, Vol. 273, No. 9-10, pp. 109-121, Oct. 2019.

[15] A. Zabasta, N. Kunicina, K. Kondratjevs, L. Ribickis: IoT Approach Application for Development of Autonomous Beekeeping System, Proc. 2019 International Conference in Engineering Applications (ICEA 2019), pp. 1-6, Jul. 2019.

[16] A. Zabasta, A. Zhiravetska, N. Kunicina, K. Kondratjevs: Technical Implementation of IoT Concept for Bee Colony Monitoring, Proc. 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO 2019), pp. 1-4, Jun. 2019.

[17] S. Cecchi, A. Terenzi, S. Orcioni, S. Spinsante, V. Primiani, F. Moglie,S. Ruschioni, C. Mattei, P. Riolo,N. Isidoro: Multi-sensor platform for real time measurements of honey bee hive parameters, Proc. 1st Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (METROAGRIFOR), Oct. 2018.

[18] V. Kulyukin, S. Mukherjee, and P. Amlathe: Toward Audio Beehive Monitoring: Deep Learning vs. Standard Machine Learning in Classifying Beehive Audio Samples, Applied Sciences, Vol.8, No. 9, pp.1-33, Sep. 2018.

[19] A. Kviesis and A. Osadcuks: Proc. Development of Internet of Things concept for Precision Beekeeping, 18th International Carpathian Control Conference (ICCC 2017), pp.23-27, July 2017.

[20] 株式会社アドダイス: 養蜂業支援 AI – Bee Sensing, <https://ad-dice. com/ solution_category/beesensing/> (参照 2022-05-01).

[21] Espressif Systems Co., Ltd.: ESP32, 入手先<https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32> (参照 2022-05-01).

[22] TE Connectivity Ltd.: HTU21D Digital High Accuracy RH/T Sensor, 入手先 <https://www.te.com/usa-en/product-CAT-HSC0004.html> (参照 2022-05-01).

[23] Avia Semiconductor (Xiamen) Ltd.: HX711, 入手先 <http://en.aviaic.com/detail/730856.html> (参照 2022-05-01).

[24] Silicon Laboratories Inc.: CP2102/9 Single Chip USB-UART Bridge, 入手先 < https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/CP2102-9.pdf>

[25] Advanced Monolithic Systems Inc. : AMS1117 1A LOW DROPOUT VOLTAGE REGULATOR, 入手先 <http://www.advanced-monolithic.com/pdf/ds1117.pdf> (参照 2022-05-01).

[26] Texas Instruments Inc.: TLV75533PDBVR, 入手先<https://www.ti.com/store/ti/en/p/product/?p=TLV75533PDBVR> (参照 2022-05-01).

[27] Nanjing Qinheng Microelectronics Co., Ltd.: USB to UART Bridge Controller CH340, 入手先 <http://www.wch-ic.com/products/CH340.html> (参照 2022-05-01).

[28] TDK Corporation: ICS-43432 Low-Noise Microphone with I2S Digital Output, 入手先 <https://invensense.tdk.com/products/digital/ics-43432/> (参照 2022-05-01).

[29] Guangzhou Aosong Electronic Co., Ltd.: AHT21 Integrated temperature and humidity sensor, 入手先<aosong.com/en/products-60.html> (参照 2022-05-01).

[30] 吉竹隆也, 佐藤証: 小型･省電力センサによるスマート養蜂システム, マルチメディア, 分散, 協調とモーバイル (DICOMO2021) シンポジウム, 4H-2, pp.838-843, 2021 年 6 月.

[31] STMicroelectronics N.V.: VL53L0X World's smallest Time-of-Flight ranging and gesture detection sensor, 入手先 <https://www.st.com/resource/en/datasheet/vl53l0x.pdf> (参照 2022-05-01).

[32] Grafana Labs: Grafana: The open observability platform, 入手先 <https://grafana.com/about/team/> (参照 2022 -05-01).

[33] Eclipse Foundation: Eclipse Mosquitto™ An open source MQTT

© 2022 Information Processing Society of Japan

broker, 入手先 <https://mosquitto.org/> (参照 2022 -05-01).
[34] OpenJS Foundation: Node-RED Low-code programming for event-driven applications, 入手先 <https://nodered.org/> (参照 2022 -05-01).
[35] InfluxData Inc.: InfluxDB: Open Source Time Series Database, 入手先 <https://www.influxdata.com/> (参照 2022 -05-01).
[36] Home Assistant, Inc.: Home Assistant, 入手先 <https://www.home-assistant.io/> (参照 2022 -05-01).
[37] 寺田充樹, 佐藤証: 養蜂のための外敵検出カメラシステムの開発, マルチメディア, 分散, 協調とモーバイル (DICOMO2021) シンポジウム, 4H-1, pp.833-837, 2021 年 6 月.
[38] 農林水産省: 養蜂をめぐる情勢, 令和 3 年 10 月, 入手先 <https://www.maff.go.jp/j/chikusan/kikaku/lin/sonota/attach/pdf/bee-38.pdf> (参照 2022-05-01)
[39] 一般社団法人 日本養蜂協会: ミツバチ盗難についての注意喚起及び被害状況調査について, 日蜂協第 31 号, 令和 2 年 2 月 28 日, 入手先 <http://www.beekeeping.or.jp/wordpress/wp-content/uploads/2020/03/200228-mitsubachi-tonan.pdf> (参照 2022 -05-01)
[40] Semtech Corporation: Semtech LoRa Technology Overview, 入手先 <https://www.semtech.com/lora> (参照 2022-05-01).
[41] Arduino: Arduino MKR WAN 1310, 入手先 <https://docs.arduino.cc/hardware/mkr-wan-1310> (参照 2022-05-01).

本研究の一部は, 令和 3 年度日本中央競馬会畜産振興事業の支援を受けて実施された.

© 2022 Information Processing Society of Japan