

# Wi-Fi / BLE対応IoTデバイスにおける消費電流の自動計測

常三島技術部門  
情報システムグループ

辻 明典 (TSUJI Akinori)

## 1. はじめに

IoT (Internet of Things) は、身の回りのあらゆるモノをネットワークに接続し、そこで得られた知見を基に新たな価値を創出する枠組みである。IoTシステムには、さまざまな無線規格に対応したIoTデバイスが存在し、通信距離や通信速度、消費電力等、システムの要件に応じたデバイスが使用される。特に、消費電力は機器の小型化や長期安定動作において重要であるが、デバイスに使用するマイコンやセンサのカタログ値と実機による動作時の消費電力との間に大きな差が生じることがある。そこで本研究では、Wi-Fi / BLEに対応したIoTデバイスについて、使用条件の違いによる消費電流の詳細な計測を行うことを目的とする。実験では、温湿度センサを搭載した評価ボードを制作し、実使用を想定したプログラムを実行して消費電流の計測を行った。さらに、消費電流の計測にSCPIコマンドによる自動計測の仕組みを導入し、煩雑な計測機器の操作を自動化したので報告する。

## 2. IoTシステム

一般的なIoTシステムの構成を図1に示す。IoTシステムは、センサからデータを取得するIoTデバイス、インターネットに接続を行うゲートウェイ、データの収集、記録、分析を行うクラウドサーバより構成される。IoTデバイスには、さまざまな無線通信規格の機器が使用されるが、IoTシステムの用途や設置環境に応じて最適なものが選択される。スマートウ

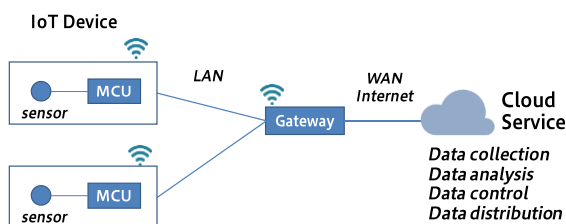


図1 一般的なIoTシステムの構成

ォッチやヘルスケアデバイス等のモバイル機器や温湿度センサ、動きセンサ等の環境計測機器をはじめとして、電池で動作する機器の多くは、無線通信時の電力消費が長期安定動作の課題となる。次に、IoTデバイスの無線通信規格、電池容量について述べる。

### 2.1 無線通信規格

表1に、IoTデバイスに使用される無線通信規格を示す。各無線通信規格の特徴を示すため、通信距離、通信速度、消費電力の比較を挙げる。無線通信規格には、それぞれ一長一短があり、すべての条件を満たす規格は存在しない。たとえば、Wi-Fiは市販の無線ルータをゲートウェイとして利用でき入手性が良く安価で通信速度が速い反面、消費電力が大きいデメリットがある。Bluetoothは消費電力が低く、PCやスマートフォン等に採用されて実績が豊富だが、通信速度が遅く、プロトコルの実装が複雑である。LTEは公衆回線を使用して長距離通信が可能で、ゲートウェイなしで直接クラウドにデータを送れるが、通信時の消費電力が大きく、また通信コストもかかる。本研究では、施設内、室内等の比較的短距離(~20m)のIoTシステムの運用を想定して、Wi-Fi (IEEE802.11b/g/n), Bluetooth (Bluetooth4.2, BLE) の無線規格を実装したIoTデバイスについて検討する。

表1 無線通信規格の比較

通信規格	通信距離	通信速度	消費電力
Bluetooth	10 - 300 m	125 kbps - 2 Mbps	低
Wi-Fi	15 - 100 m	54 Mbps - 1.0 Gbps	中
ZigBee	30 - 100 m	20 - 250 kbps	低
LTE	< 10 km	1 Mbps	高
Sigfox	3 - 50 km	100 kbps	低
LoRa	2 - 20 km	10 kbps	低

### 2.2 電池容量

IoTデバイスに使用される電池として、アルカリやマンガン乾電池等の使い切りの電池(一次電池)、リチウムイオンやニッケル水素

等の充電ができる電池(二次電池)がある。電池容量は、電池の使い始めから使い終わりまでに電池から放電できる電気量で決まり、放電時の消費電流[Ampere]と終止電圧までの時間[hour]の積を単位としてアンペアアワー[Ah]として表される。電池動作のIoTデバイスでは、機器の小型化や長時間動作が求められるが、通信規格や通信速度、通信頻度等の使用条件の違いによって消費電流が大きく変わる。そのため、無線通信を伴うIoTデバイスにおける動作時の消費電流の計測は、機器の長時間動作や電池寿命の観点から重要である。

### 3. IoTデバイスの消費電流と自動計測

IoTデバイスの消費電流を計測するため、図2の評価ボードを制作した。評価ボードには、電源供給コネクタ、昇降圧型DC-DCコンバータTPS63020 (Texas Instruments社)、高精度低損失レギュレータADP3338 (Analog Devices社)、無線機能を搭載したマイコンESP-WROOM-32 (Espressif Systems社)、温湿度センサSHT31 (Sensirion社)、およびプログラミングインタフェースを実装した。ここでは、Wi-Fi/ BLEに対応したIoTデバイスの動作について述べた後、計測の自動化について説明し、消費電流の計測方法について述べる。

#### 3.1 Wi-Fi / BLEに対応したIoTデバイス

図3に、評価ボードのブロック図を示す。IoTデバイスの実使用を想定し、電源供給はアルカリ乾電池2本(1.5V 2個) 3.0Vとした。マイコン、センサへの電源は、電池の電圧3.0Vを昇降圧型DC-DCコンバータによって5.0Vに昇圧し、さらに定電圧レギュレータで3.3Vに安定化して供給する。ここで、DC-DCコンバータで5.0Vに昇圧するのは、電池残量が少なくなったとき、レギュレータの電圧降下によってマイコンの動作電圧を下回らないようにするためである。マイコンのプログラムは、プログラミングインタフェースにプログラマを接続して書き込みを行う。消費電流の計測は、電源供給端子のプラス側にデジタル・マルチメータの電流計測端子を接続して行う。マイコンは、Wi-Fi/ BLEの無線機能を搭載し、プログラムにより各無線機能を有効・無効に

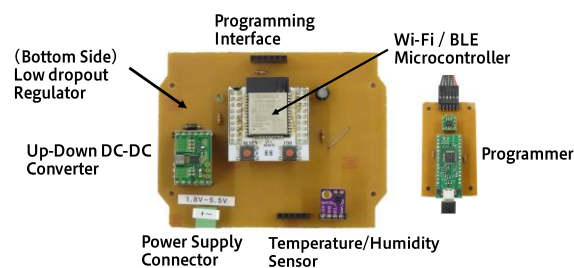


図2 温湿度センサを搭載した WiFi/ BLE 対応 IoT デバイス (評価ボード)

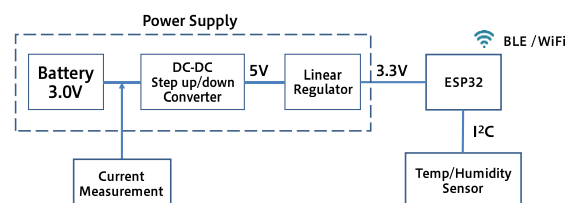


図3 評価ボードのブロック図

設定できる。また、センシング中以外は、スリープして消費電力を低減する機能がある。

#### 3.2 SCPIによる消費電流の自動計測

SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments) は、計測機器向けに設計された測定器用のコマンド言語である<sup>[1]</sup>。SCPIに対応する機器であれば、いくつかある機器の操作手順をSCPIコマンドの実行により自動化できる。本研究では、IoTデバイスの消費電流の計測に6.5桁のデジタル・マルチメータ34465A (Keysight社)を用いた。

機器の電源を入れた後、手動による消費電流の計測手順は、次のとおりである。

1. 計測モードを直流電流(DCI)にセット
2. 測定レンジを1Aにセット
3. 積分時間を1にセット
4. サンプリング時間を1msにセット
5. 計測端子を3Aにセット
6. 分解能を最大にセット
7. トリガーカウントを1にセット
8. 取得サンプル数を10,000にセット
9. 計測開始
10. 計測終了。メモリに記録されたデータをPCに転送して保存

これらの操作の一部は計測機器のデフォルト設定だが、電源を入れる度に設定が必要で、また内蔵メモリに上限があることから、計測

表2 SCPI コマンドによる計測の自動化

```
*RST;*CLS //リセット、クリア
DISP OFF //ディスプレイオフ
CONF:CURR:DC 1A,0.00001 //DCA測定, 1Aレンジ, 5桁半表示
SENS:CURR:DC:NPLC 1 //積分時間を最小に設定
SAMP:TIM 1.0E-2 //サンプリング時間を10msに設定
SENS:CURR:DC:TERM 3 //計測端子を3Aに設定
SENS:CURR:DC:RES MAX //分解能を最大に設定
TRIG:COUN 1 //トリガーカウントを1に設定
SAMP:COUN 10000 //サンプル数を10000に設定
INIT //計測開始
FETC? //データ取得
DATA = .ReadList(ASCIIType_R4, ",") //データ形式の指定
For i = 0 To 9999 //サンプル数分のデータを読み込む
Sheet1.Cells(i + 1, 1) = DATA(i)
Next i
```

の度にこの手順を繰り返す必要がある。この操作手順をSCPIコマンドに置き換えることで、すべての操作手順を自動化できる。表2に、SCPIコマンドによるコード例を示す。作成したコードの実行によって、消費電流の計測データが得られ、またPCへのデータ転送も同時に行われる。コード例では、エクセルに直接データを追記し、計測が終了するとグラフが自動で描画される。

### 3.3 消費電流の計測と電池による動作時間

マイコンやセンサの消費電流は、データシートの仕様から代表的な値を調べられるが、それらは定常時や瞬時値であることが多い。また、IoTデバイスはマイコンやセンサ、周辺回路等が協調して動作するため、仕様をもとにプログラム動作時の消費電流を求めるのは困難である。そのため、実機に近い評価ボードを用いて、その動作時の消費電流を計測することで、正確な消費電流を見積もることができる。図4に消費電流を計測したときの電流波形の例を示す。縦軸は電流、横軸は時間である。消費電流の時系列波形が得られると、センシング、データ転送、スリープ等に係る時間と消費電流の関係より、デバイスの平均消費電流を求められる。図4では、センシングの周期 $T[h]$ の間に、センシングに $T_1[h]$ の時間がかかり電流 $I_1[A]$ が流れ、待機時間 $T_2[h]$ に電流 $I_2[A]$ が流れている。このとき、1周期の平均消費電流は、 $T_1 \times I_1 + T_2 \times I_2 [Ah]$ となる。電池容量の1時間辺りに放電できる電流量 $[Ah]$ を $TI_b$ とすると、電池の動作時間は、

$$T_b = TI_b / (T_1 \times I_1 + T_2 \times I_2) \dots\dots (1)$$

により求まる。実際には、電源や周辺回路の

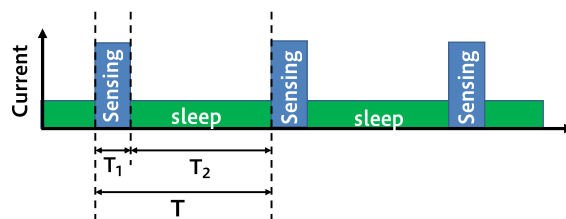


図4 デバイスの消費電流の時系列波形

電力損失、センシングの失敗、通信時のリトライ処理等を考慮して、 $T_b$ に安全率0.7~0.9を掛けて電池による動作時間を見積もる。

## 4. 消費電流の計測実験

評価ボード上でプログラムを実行し、消費電流の自動計測を行った。マイコンのプログラムとして、基本条件、スリープ動作、Wi-Fi動作、BLE動作(iBeacon)をそれぞれ実行し、動作中の消費電流を計測した。

### 4.1 基本条件

マイコンのWiFi, BLE未使用、温湿度センサ未使用のプログラムを実行し、評価ボードに電源を投入した状態の消費電流を計測した。その結果、常時、約61mAであった。次に、温湿度センサを初期化し、ポーリングによる計測プログラムを実行した。その結果、常時、約81mAであった。温湿度センサの使用により、約20mAの電流が流れることを確認した。

### 4.2 スリープ動作（無線通信なし）

マイコンには、WiFi, BLE, RTC, ULP等の機能モジュールがあり、スリープ動作時に未使用の機能を無効化する低消費電力モードがある<sup>[2]</sup>。ここでは、最も消費電力を低減できるDeep sleepモードを適用し、温湿度をセンシングした時の計測を行った。図5にDeep sleep適用時の計測波形を示す。ここで、スリープからの復帰に約110msかかり、センシングによ

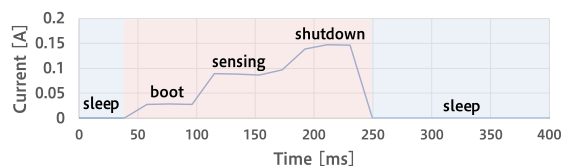


図5 Deep sleep 時の消費電流

り消費電流が約90mAに達した後、マイコンの機能を停止し約100ms後に再度スリープに遷移した。スリープ直前の50ms間に電流が約147mA流れた。スリープ時の消費電流は約25 $\mu$ Aを示し、動作時と比べ大幅な消費電流の低減を確認した。マイコンの起動、センシング、停止に係る時間は0.172s(172ms)、この間の平均消費電流は約87.6mAであった。センシングの周期をT[s]とすると、1周期の消費電流は $0.172s \times 87.6mA + (T - 0.21s) \times 0.025mA$ となる。たとえば、T=3600[s]とすると、センシングの周期は1時間となり、このとき消費電流量は約105mAhとなる。式(1)より、電池容量が1000mAhの電池を使用したとすると、約9.52時間動作すると見積もれる。

#### 4. 3 Wi-Fi動作とMQTTデータ転送

無線Wi-Fi機能を有効にして、センシングした温湿度データをMQTTによりサーバへデータ送信を行った。無線Wi-Fiはルータの設定に合わせてIEEE802.1gとした。図6に計測波形を示す。

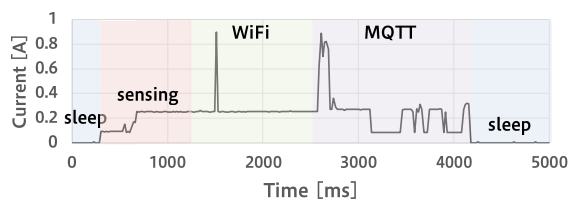


図6 Wi-Fi動作時(MQTTによるデータ送信)の消費電流

スリープから復帰後にセンシングを行い、Wi-Fi通信を開始、ルータを探索してIPアドレスを問い合わせしている。探索時にスパイク状の電流890mAが流れた。続けて、MQTTサーバとの通信確立時にも同様に、スパイク上の電流890mAが流れた。その後、温度、湿度の4バイトのデータを送信した後、スリープに遷移した。この間の時間は3.8sで、平均消費電流は約235mAであった。センシングの周期をT[s]とすると、1周期の消費電流は $3.8s \times 235mA + (T - 3.8s) \times 0.025mA$ となる。

#### 4. 4 BLE動作(iBeacon)

Bluetooth4.2(BLE)機能を有効にして、センシングしたデータをiBeaconによりパソコン

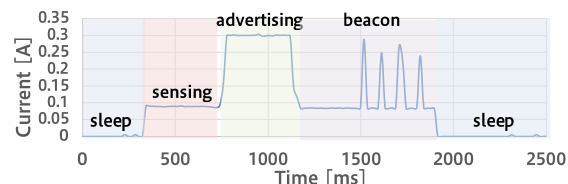


図7 BLEによるiBeacon時の消費電流

へデータ送信を行った。ここで、ビーコンの送信時間は500msとした。図7に計測波形を示す。BLEではスリープからの復帰、停止が短時間で行われた。一方、ホストにデバイスの存在を知らせるAdvertisingに約450msかかり、その後ビーコン送信時にスパイク状の電流が約250mA~300mA、4回流れた後、スリープに遷移した。この間の時間は1.55sで、平均消費電流は約146mAとなった。センシングの周期をT[s]とすると、1周期の消費電流は $1.55s \times 146mA + (T - 1.55s) \times 0.025mA$ となる。BLEでは、ビーコンの送信時間を減らすことで、さらに消費電流の低減が期待できる。

#### 5. まとめ

本稿では、Wi-Fi/ BLEに対応したIoTデバイスにおける消費電流の自動計測を行った。SCPIコマンドによる計測の自動化によって、計測機器の設定ミスやPCとのデータのやりとりが無くなり計測に係る時間を大幅に短縮できた。今回、Wi-Fi, BLEを対象としたが、IoTデバイスに電池や電源供給コネクタがあれば、デバイスに影響を与えることなく同様の仕組みで動作中の消費電流を詳細に計測できる。これにより、IoTデバイス動作時の消費電流を正確に把握できるため、試作段階での電池寿命や消費電力の見積もりが可能となった。本手法は、商用電源の供給できない環境やソーラーパネルや蓄電池等の自律発電環境で使用されるIoTデバイスの事前評価にも有効である。今後、他の無線規格やマイコンについても消費電流の調査を行う予定である。

#### 参考文献

- [1] Keysight, “Keysight TrueVolt Series Digital Multimeter 34465A”, 2018.
- [2] Espressif, “ESP32 Series Datasheet v4.2”, 2020.