

## ワイヤレス医療端末の電池寿命を延ばす

下記図1に示すように、病気や体調変化の発見・治療のために、バイタルを遠隔で監視・記録するワイヤレス医療端末の普及が進んでいます。ワイヤレス・ボディ・センサはインターネットハブや患者のスマートフォンなどの個別サーバーを介してバイタルデータをアップロードします。ワイヤレス医療端末が継続的にバイタルデータを監視し、アップロードするには、長期的なクラウドへの接続が欠かせません。医療用ウェアラブル端末が今後も急速に浸透するためには、端末の小型化、長持ちする電池及びスマートフォンの普及がカギとなります。

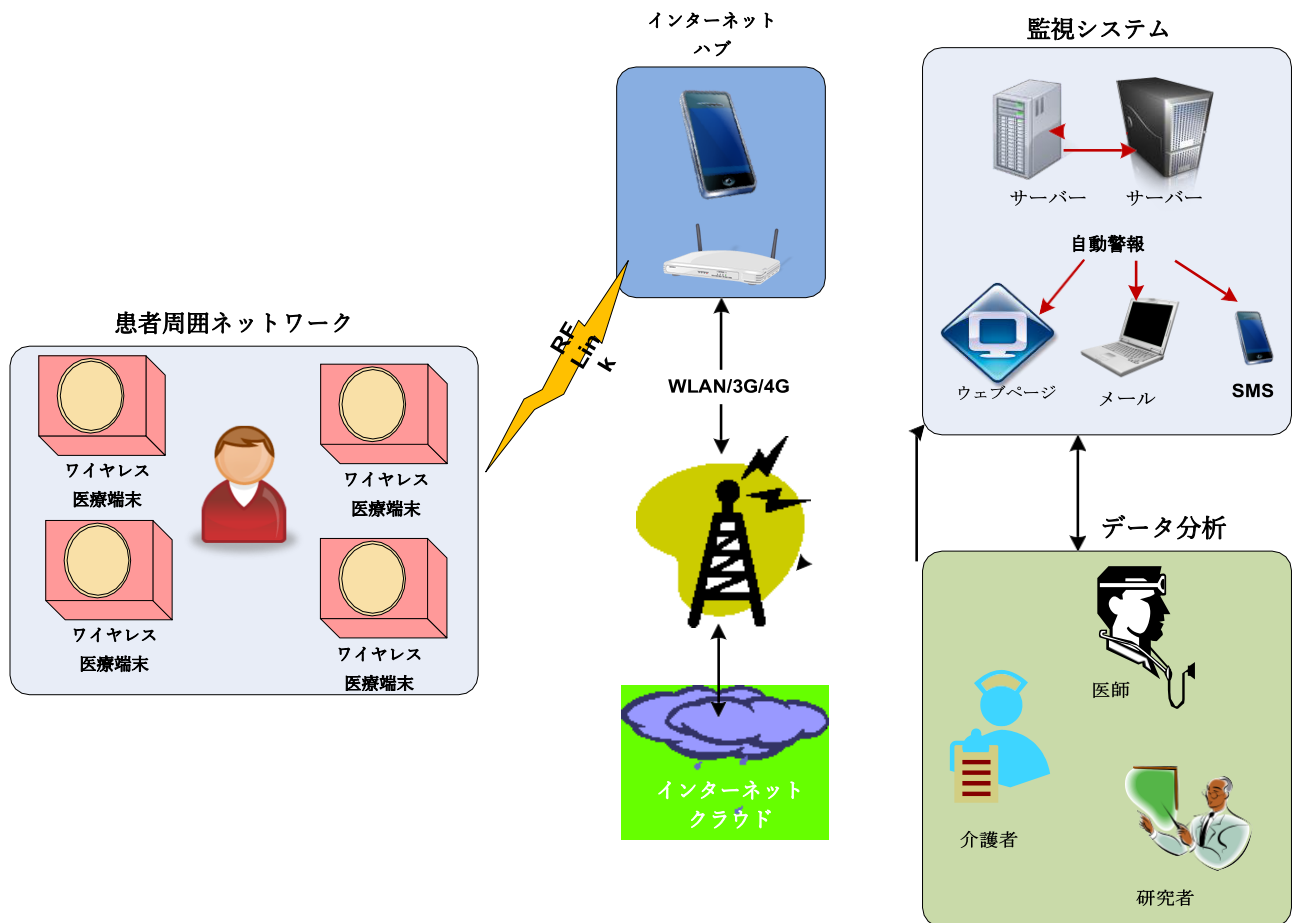


図1: U・ヘルスケアシステム概要

ウェアラブル医療端末は、データ（メタデータ）を収集・圧縮し、インターネットハブを介して、クラウドに迅速に送信した後、省エネのためにスリープモードになるよう設計されています。電池寿命は設計に採用されている無線通信やインターフェイスプロトコルの消費電力によります。

ウェアラブルセンサ端末の設計者は、下記のPAN（パーソナル・エリア・ネットワーク）低消費電力ワイヤレス通信規格から選択することが可能です。

- ANT
- ZigBee
- Bluetooth® 低消費電力 (BLE)

上記のワイヤレス通信規格は、短距離無線アプリケーションの条件を満たすように設計されています。これらの受信機は、受動部品を使用し、UART、SPIまたはUSB経由で低コストのマイクロコントローラーと接続させる事ができ、人間のバイタルを監視するのに理想的な小さな占有面積に収めることができます。

### 最も低消費電力の無線通信規格とは？

上位3つのワイヤレス通信規格を比較した独自研究結果によると、典型的なワイヤレス生体センサのネットワークである周期的なスリープ時間を比較すると、BLEの消費電力が最も低いと示されています [1]、[2]。周期的なスリープ時間は、電池を搭載している端末に通常搭載されている機能で、事前設定された「スリープ時間」（通常2秒～10秒間シャットダウン）の数ミリ秒の短い時間帯にバイタル情報を送信する際にのみ起動します。これにより、図2に示すように低消費電力での稼働が可能となり、全体的な消費電力の低減に繋がります。

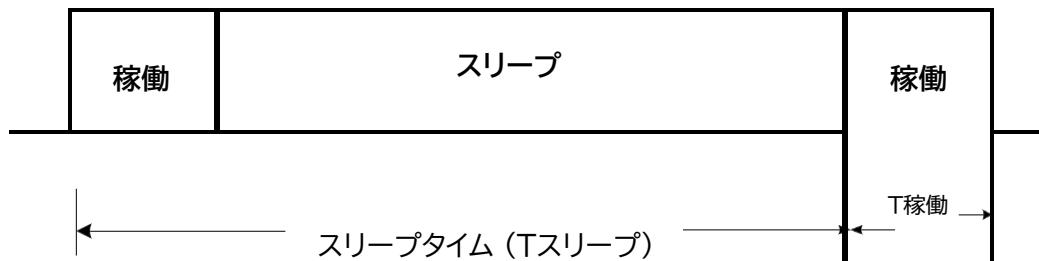


図2: 周期的なスリープ・稼働時間：平均使用電力は周期（ $T_{稼働}/T_{スリープ}$ ）に正比例する

3つのワイヤレスモジュールを使用し、様々なパターンでのスリープ間隔における平均消費電力を測定した実験結果があります[1]。図3に示すように、RFモジュールの消費電力の結果は、スリープ間隔に関わらず、BLEプロトコルがANTおよびZigBeeと比較しても、一番消費電力が少なかったことを示しています。3つのRF規格すべてにおいて、消費電力はスリープ間隔に反比例することが確認されています。

スマートフォンが普及し、Bluetooth4.0にも対応していることから、BLEはウェアラブル医療端末に最も適していると考えられます。スマートフォンの使用が禁止されている特定の医療環境においては、BLEインターネットブリッジを代替として使用することが可能です。

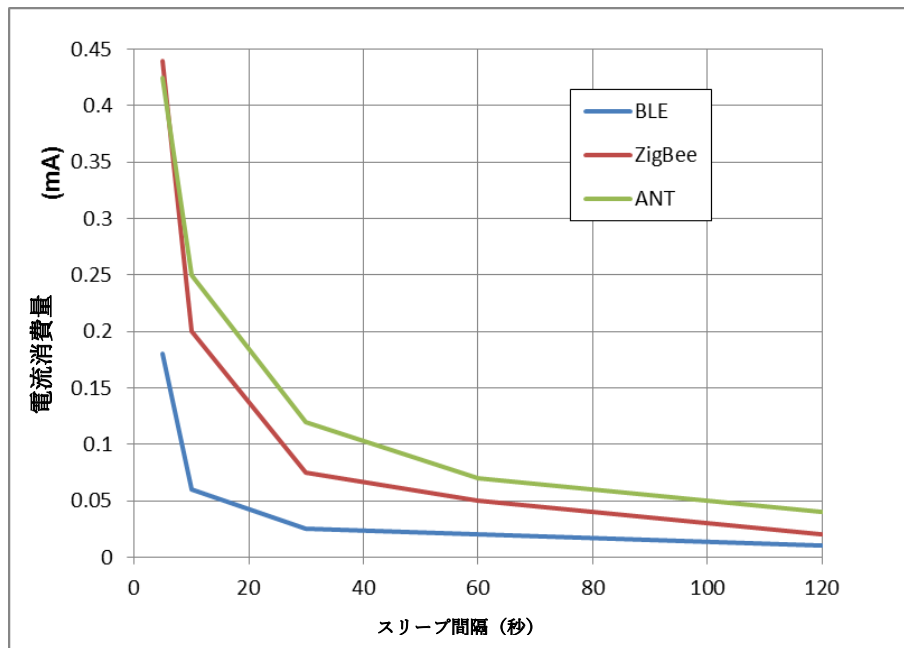


図 3: 3つのワイヤレス規格の消費電力とスリープ間隔の関係性

### 医療端末におけるBLE

一般的なワイヤレス医療端末は、図4に示すように、生体センサと連動する低消費電力の32ビットMCUとRFフロントエンドのシステム・オン・チップ(SoC)で構成されています。

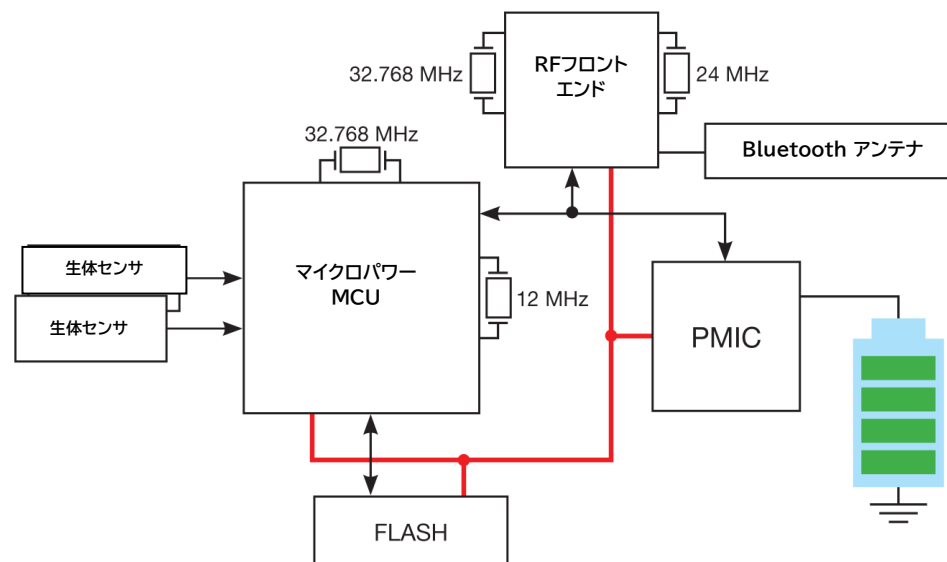


図 4: ワイヤレス医療端末の構成図

センサデータの収集場所として機能する低消費電力のMCUは、I2CまたはUARTインターフェイスを介してBLE RFフロントエンドにバイタルを送信し、下記のクロック源で作動します。

- 12 MHz 水晶振動子
  - 周波数の許容範囲: 0 ~ 70° Cで+/- 30 ppm
  - ARM Cortex-M3 コア、および周囲のクロックに使用
- 32.768 kHz 水晶振動子
  - 周波数の許容範囲: 0 ~ 70° Cで-200 ppm
  - リアルタイムクロック(RTC) およびウォッチドッグタイマに使用

BLE RF フロントエンドは、Bluetooth 4.0 のPHY層とGATTプロファイル（血糖値、体温、血圧など）を含むBLE リンク 層を搭載し、2つのクロック源で作動します。

- 24 MHz 水晶振動子
  - 周波数の許容範囲: 0 ~ 70° Cで+/- 20 ppm
  - ベースバンド処理とRF 2.5 GHz の合成に使用
- 32.768 kHz 水晶振動子
  - 周波数の許容範囲: 0 ~ 70° Cで-200 ppm
  - スリープクロックのタイミングに使用

BLE医療端末の消費電力「スリープ」状態の時間に反比例し、この「スリープ」状態を図るための32kHzクロックのスリープクロック精度（SCA）が端末の電池寿命に直接影響することが実証されています。より理解するために、BLEスレーブ（患者に取り付けた医療端末）とペアになっているBLEマスター（インターネット・ハブ）がどのように接続されるのかを簡単に説明します。BLEスレーブのダイナミックIDDのタイミングの詳細を見ると、図5にあるように、BLE端末の接続のタイミング・プロファイルを表しています。

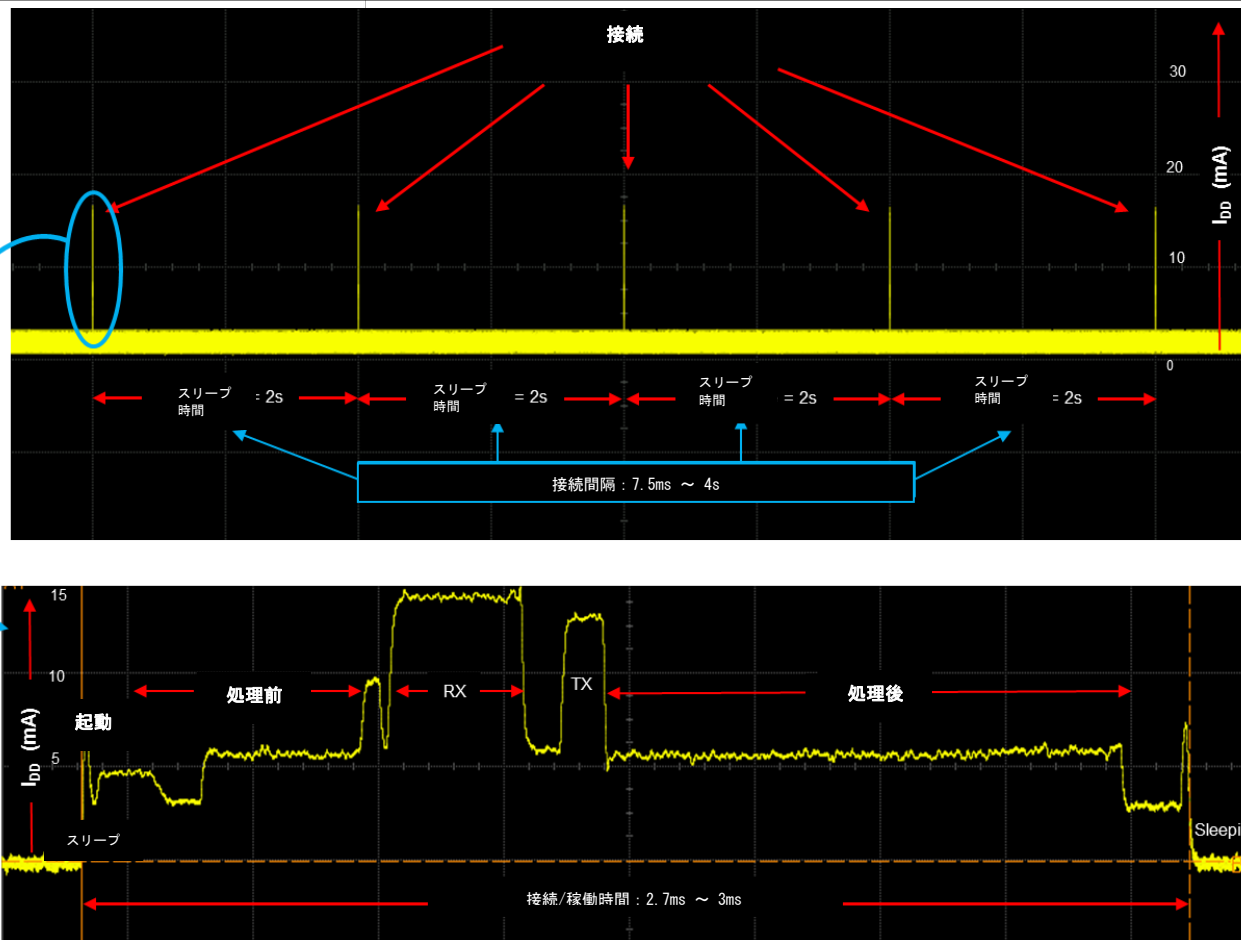


図 5: IDD電流測定によりTI CC2541 BLE SoCの接続タイミング・プロファイル

なお、BLE規格では「スリープ時間」は「接続間隔」という言葉で使われ、その範囲は7.5マイクロ秒～4秒です。接続とは端末の特定の機能ブロックが起動し、0.08マイクロ秒～1.3マイクロ秒の範囲で短時間作動する「オン」状態の時間のことを指します（図5の拡大写真を参照）。

以下のリンクパラメータは接続毎にBLEスレーブがBLEマスターと交渉します。

- 接続間隔 (スリープ時間)
- スリープ遅延
- 監視タイムアウト

スリープ遅延の値がN ( $N < 500$ ) の場合、スリープ時間はNの接続間隔分延長されます。例：接続間隔=2秒、スリープ遅延=5の場合、スリープ時間は $2 \times 5 = 10$ 秒に延長されます。リンクパラメータの監視タイムアウトは、ペアされているスレーブが設定した時間内に応答しない場合、マスターが接続を終了できるように使用します。範囲：100マイクロ秒～32秒。

32kHzのスリープクロック精度（SCA）をより深く理解するため下記図6に示しているペアされたマスターとスレーブが接続する際にやり取りするリンク層（LL）のメッセージを確認してみましょう。

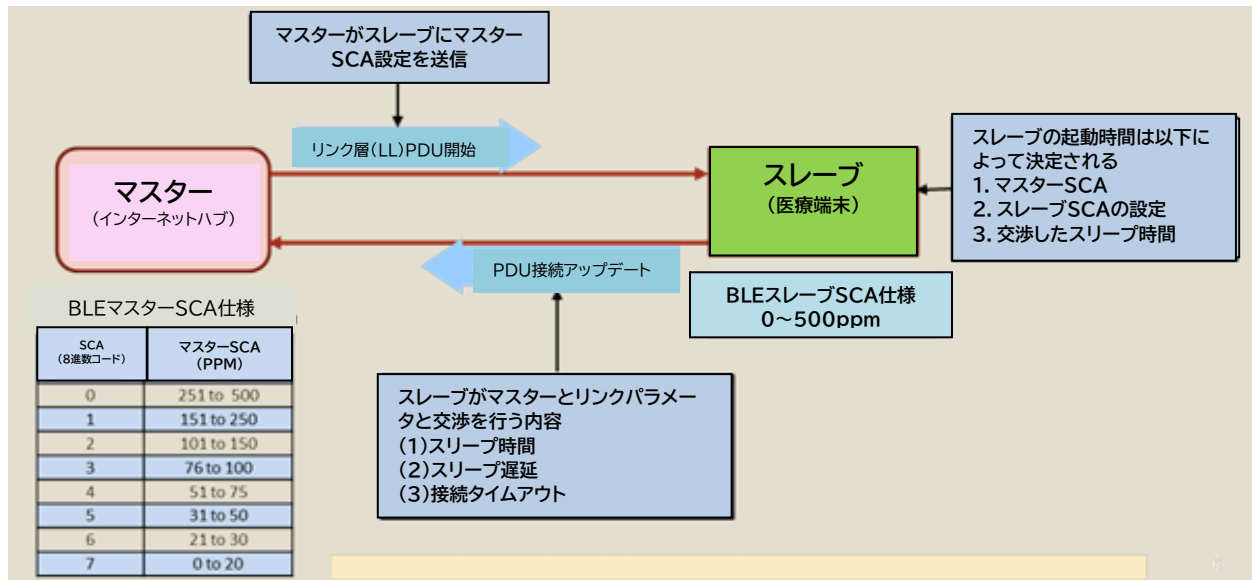


図6: 接続される際のリンクパラメータのBLEマスター/スレーブのやり取り

接続される度にマスターのスリープクロック精度（マスターSCA）がスレーブに通知されます。スレーブは、下記の組み合わせに基づいて、周期的に接続される事に対して、起動するタイミングを決定します。

- 最後に交渉した接続間隔
- マスターSCA
- スリープクロック精度（スレーブSCA）

スレーブがスリープ状態から起動し、マスターから情報を受信する際にスリープクロックの誤差のため、ある程度の不確実性があります。この不確実性のため、スレーブは少し早く起動し（受信機をオンにして）受信を開始します。これを「ウィンドウワイドニング（枠の拡大）」と呼ばれるプロセスです。Bluetooth 4.0の仕様書vol.6によると、この枠の拡大（または早期起動時間）の時間 $\Delta T$ は以下の式で算出できます。

$$\Delta T = \text{ウィンドウワイドニング} = ((\text{マスターSCA} + \text{スレーブSCA}) / 1000000) * (\text{最後の接続間隔})$$

ここで:

- マスターSCA はマスター32 kHzスリープクロックの精度 (ppm)
- スレーブSCA はスレーブ32 kHzスリープクロックの精度 (ppm)
- 最後に交渉した接続間隔は、最後に接続が完了した接続間隔 (単位: 秒)

図7は、スリープクロックの不正確さによる枠の拡大または早期起動時間 $\Delta T$ を示しています。

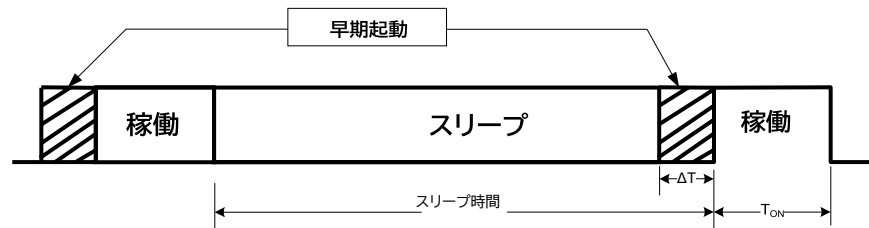


図7: スリープ時間の誤差による接続のプロファイル

この「ウィンドウワイドニング（枠の拡大）」は図8に示すスレーブのRXウィンドウの幅の広がり  
に直結します。様々なSCA設定におけるRXウィンドウの幅を定量化するために、TI BLE アプリケー  
ション・ノート[3]で参照されているものと同様のテスト状況（図8参照）でBLEスレーブの電流プロフ  
ァイルを測定しました。

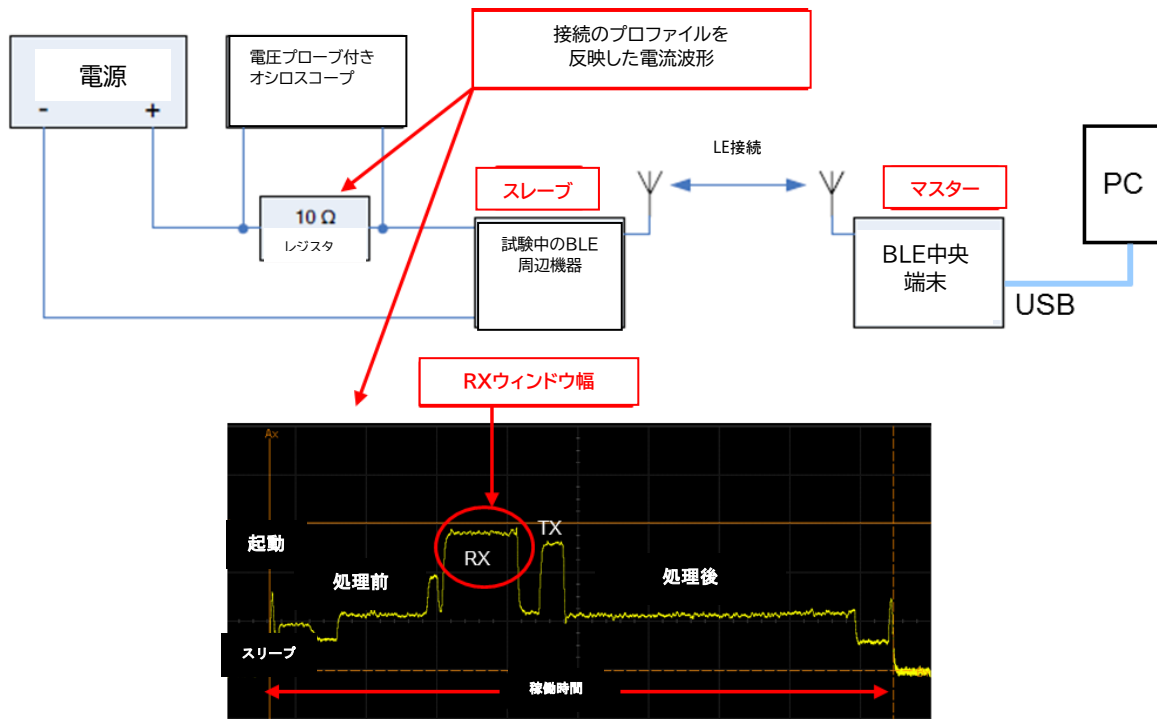


図8: スリープクロックの精度の変化とBLEスレーブRXウィンドウ幅の測定

スレーブにプログラムされているリンクパラメータ:

- 接続間隔 = 2秒
- 待ち時間 = 0
- 監視タイムアウト = 32秒

BLEスレーブの32kHz水晶振動子は、高精度の32kHz 5ppm TCXO(SiTime社製SiT1552)に置き換  
えられ、スレーブSCA=5ppm となり、ホストPC上でベンダーが提供するGUIを用いて、マスター  
SCAの値を20 ~500ppm の範囲で8段階に分け掃引しました。各マスターSCA設定について、接続中  
のRX幅の測定を行いました（稼働時間）。



マスターSCA 3-bit Field	スリープSCA (ppm)	マスターSCA + スリープSCA (ppm)	RX 幅 $\mu$ s	32 kHz TCXOとのリンク インテグリティ (5 ppm)	32 kHz 水晶振 動子とのリンク インテグリティ
0 (最大500 ppm)	5	505	1188	良	良
1 (最大250 ppm)	5	255	688	良	良
2 (最大150 ppm)	5	155	487	良	良
3 (最大100 ppm)	5	105	386	良	良
4 (最大75 ppm)	5	80	337	良	良
5 (最大50 ppm)	5	55	287	良	良
6 (最大30 ppm)	5	35	250	良	良
7 (最大20 ppm)	5	25	227	良	タイムアウト

表 1: スリープRXウィンドウの幅に対するスリープクロック精度(SCA)の影響

表 1 に示したRXの幅の測定値は、ウィンドウ拡大の方程式と関連しており、幅はSCAの組み合わせに比例して大きくなります。

### 電池寿命を延ばす

マイクロパワーMCUを利用しているため、数ミリ秒の単位で稼働し、稼働中システム電力の多くは、ワイヤレス医療端末のBLE RFフロントエンドによって決定されます。前述したように、32kHzのスリープクロックの誤差により、BLEワイヤレス受信機(RX)はマスターからのパケットを逃さないように、早期に起動し、より長く稼働するため、装置全体の電力負荷が大きくなっています。

スリープクロック 精度 \ スリープ 間隔	2 秒	20 秒	50 秒
	早期起動		
5 ppm	0.01 ms	0.1 ms	0.25 ms
50 ppm	0.10 ms	1.0 ms	2.5 ms
70 ppm	0.14 ms	1.4 ms	3.5 ms
200 ppm	0.40 ms	4.0 ms	10.0 ms

- $T_{ON} = 3 \text{ ms}$  (typical)
- 5 ppm スリープクロック (SCA = 5) と 20 秒のスリープ時間の場合  $\Delta T1 = 0.1 \text{ ms}$
- 200 ppm スリープクロック (SCA = 200) と 20 秒のスリープ時間の場合  $\Delta T2 = 4.0 \text{ ms}$

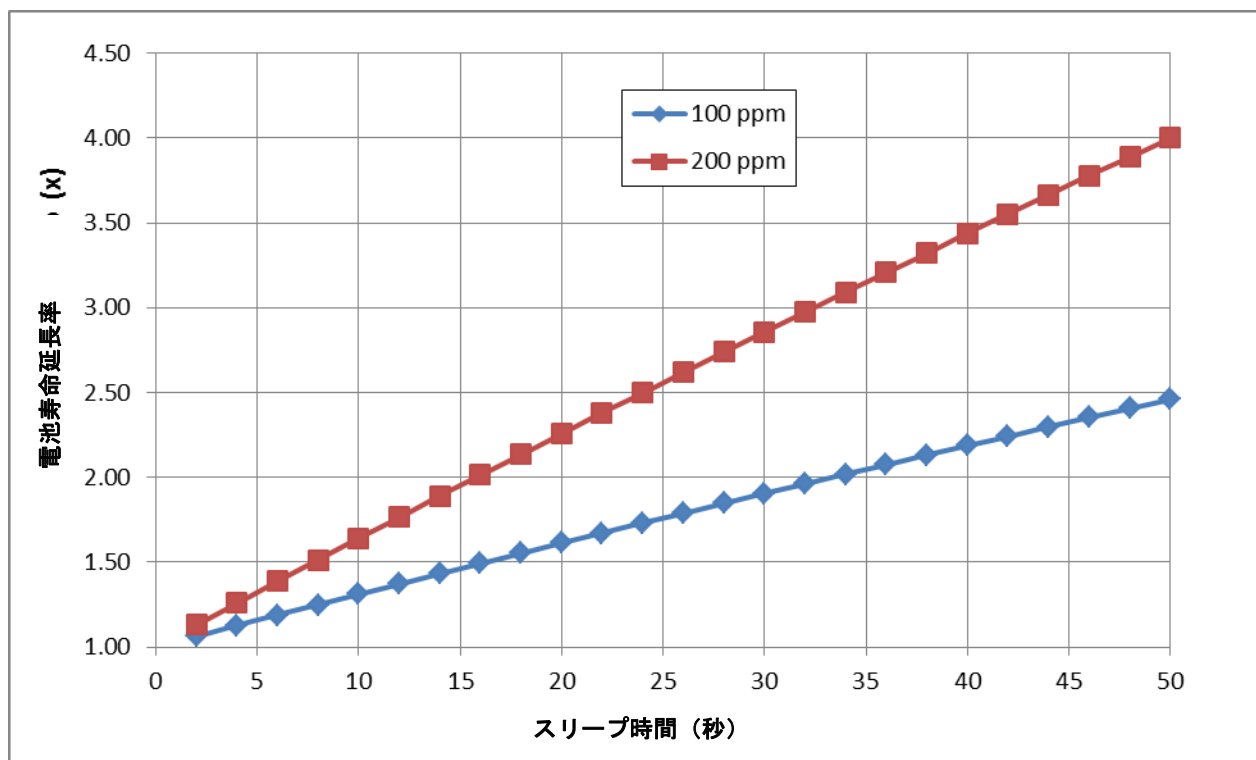


端末の電力損失は、総稼働時間 ( $\Delta T + T_{ON}$ ) に正比例し、電池寿命延長率は端末の消費電力に反比例します。

$$P2/P1 = (\Delta T2 + T_{ON}) / (\Delta T1 + T_{ON}) = 2.26 \text{ 倍}$$

図9のプロットは5ppmのスリープクロックが70ppm および200ppmの32kHzクロック源に対して達成可能な電池寿命の延長を示しています。例えば、スリープ間隔が20秒の場合、5ppmの32kHzスリープクロックは、200ppmのスリープクロックに比べて2倍以上の電池寿命の延長が可能です。

図 9: 100ppmおよび200ppmのXOに対するSiT1552 5ppm 32kHz TCXOの電池寿命延長率



### 電力の最適化を図った医療端末

ウェアラブル医療端末の設計者はワイヤレスRXのウィンドウ幅を最適化して、スリープ時間を延長させた上で、正確に起動させるためのより高精度な32kHzスリープクロックの代替品を使用する事ができます。SiTimeのMEMS SiT1552小型ファクタ (1.5×0.8mm) の32.768kHz TCXOは-40～85°Cの範囲で±5 ppmの周波数公差、従来の設計で使用されていた200ppmの32kHz水晶振動子のスリープクロック源に代わるものとして利用する事ができます [4]。SiT1552 TCXOを用いた医療端末設計を最適化したものが図10に記載されています。

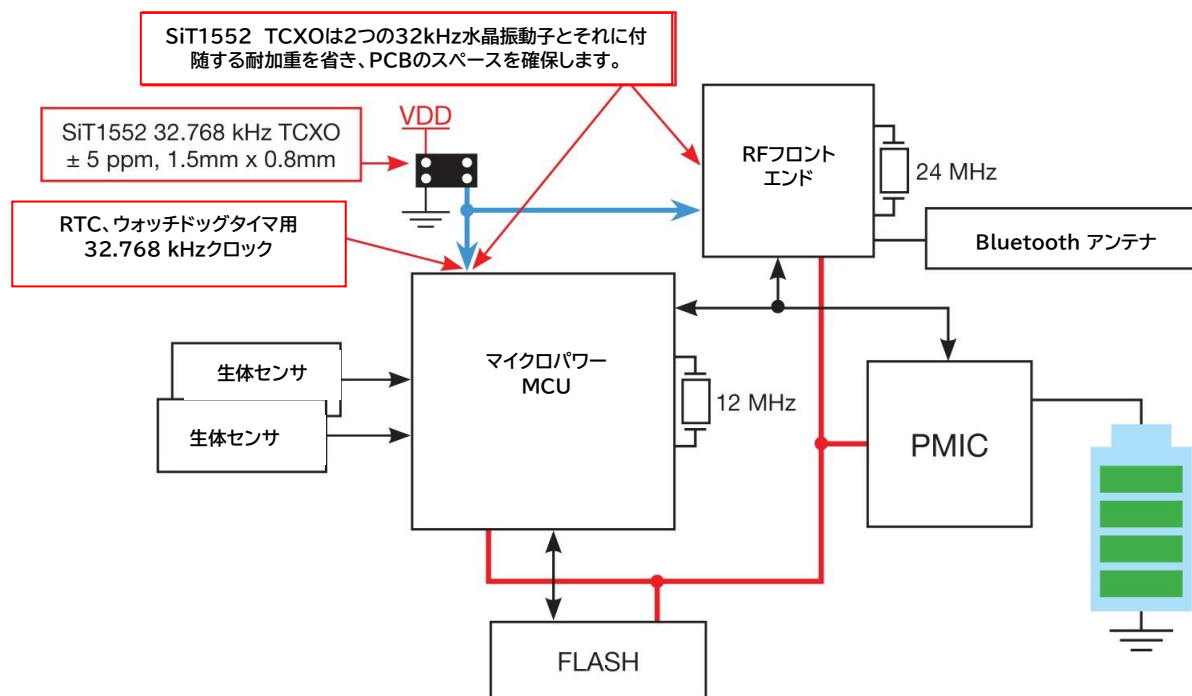


図10: 従来の32kHz水晶振動子の代わりにSiT1552 TCXOを使用した医療端末設計の最適化

SiT1552 TCXOは複数のCMOS負荷を稼働することが可能で、大型のBLEスリープクロック水晶振動子とMCU RTC 32kHz水晶振動子の両方を省くことで、貴重な基盤面積を節約することができます。設計者は圧縮機能を利用し、要求された時のみ重要な情報を短時間で送信する事が可能です。また端末を最低電力消費モードのスリープ状態に長時間保つ事が可能で、電池寿命を最大2倍延ばす事ができます。

#### 参考資料

- [1] A. Dementeyev, S. Hodges, S. Taylor and J. Smith, 「周期的スリープシナリオにおける Bluetooth 低電力、ZigBeeとANT Sensor Nodes の消費電力分析」 *IWIS*, Austin, 2013.
- [2] R. Tabishi, M. B. Adel and F. G. A. Taouti, 「U-ヘルスケア・アプリのためのBLEと6LoWPANの比較分析」 *IEE GCC*, Qatar, 2013.
- [3] Texas Instruments, 「AN092 : Bluetooth® 低電力の消費電力を測定」 *TI*, Dallas, 2012.
- [4] SiTime Corp, 「SiT1552 データシート」  
<http://www.sitime.com/products/datasheets/sit1552/SiT1552-datasheet.pdf> SiTime Corp, Sunnyvale, 2014.

SiTime Corporation, 990 Almanor Avenue, Sunnyvale, CA 94085 USA Phone: +1-408-328-4400 [www.sitime.com](http://www.sitime.com)

© 2015 SiTime Corporation. The information contained herein is subject to change without notice. Unauthorized reproduction or distribution is prohibited.