

スマホで見る血液の流れ ——超小型ウェアラブル血流センサ

ヒトの全身を巡り、私たちの生命を支えている血液の流れは、心身の状態によってダイナミックに変化しており、豊富な情報を含んでいます。日常生活における血液の流れを視覚化することができれば、健康や美容、スポーツなどの分野でさまざまな応用が期待されます。本稿では、スマートフォンと連携して、いつでもどこでも血液の流れを視ることを可能にする、超小型のウェアラブル血流センサを紹介し

くわばら けい†1 ひぐち ゆういち†2
桑原 啓 /樋口 雄一
 こいずみ ひろし†2 かきはら りょういち†1
小泉 弘 /笠原 亮一

NTTデバイスイノベーションセンタ^{†1}
 NTT先端集積デバイス研究所^{†2}

ヒトの体と血液の流れ

ヒトの成人の体は、数十兆個もの細胞によって構成されていると考えられています⁽¹⁾。これらの細胞が生きていくために必要な酸素や栄養素は、全身を巡る血液から供給されています。また、細胞が排出する二酸化炭素や老廃物なども、血液の流れに乗って回収されます。血液の主成分である赤血球の数はヒトを構成する細胞数の大きな割合を占めており、私たちの生命は血液の流れによって支えられているといえます。

その重要な血液の流れが滞ってしまうと、さまざまな健康上の問題が発生します。日本人の死因の2位と3位を占める心疾患や脳血管疾患はその代表例です。また、日常的に多くの人が悩まされている、冷えやしびれ、こりといった体の不調も、血液の流れの滞りが主な原因と考えられています⁽²⁾。さらに、美容やスポーツ医学などの分野においても、血液の流れの重要性が認識されています。

このように、血液の流れは私たちの生活にとって非常に重要なものであり、血液の流れを把握することができれば、生活スタイルを見直して血行を

改善するなどの行動につなげることもできます。しかしながら、現在、日常的に血液の流れを測ることはできません。市販されている血流計は大きくて持ち運ぶことはできず、高価であるため病院などでしか利用できないからです。そこでNTTではこれまでに通信の研究開発を通じて培ってきた技術を応用し、携帯可能な小型血流センサの研究開発を進めてきました⁽³⁾。本稿では、この技術をさらに推し進め、身につけた状態で日常生活における血液の流れを長時間にわたって視覚化できるようにした、スマートフォン連携型の

血流センサを紹介し

システム構成と動作原理

今回試作した血流センサのシステム構成を図1に示します。本システムは、センサ端末と、スマートフォン用の専用アプリケーションから構成されています。また、センサ端末は、センサヘッドとメインユニットから構成されています。センサヘッドにはレーザー(LD: Laser Diode)と受光素子(PD: Photo Diode)が搭載されており、レーザーから赤外光を皮膚に照射して、散乱された光を受光素子で検出します。血

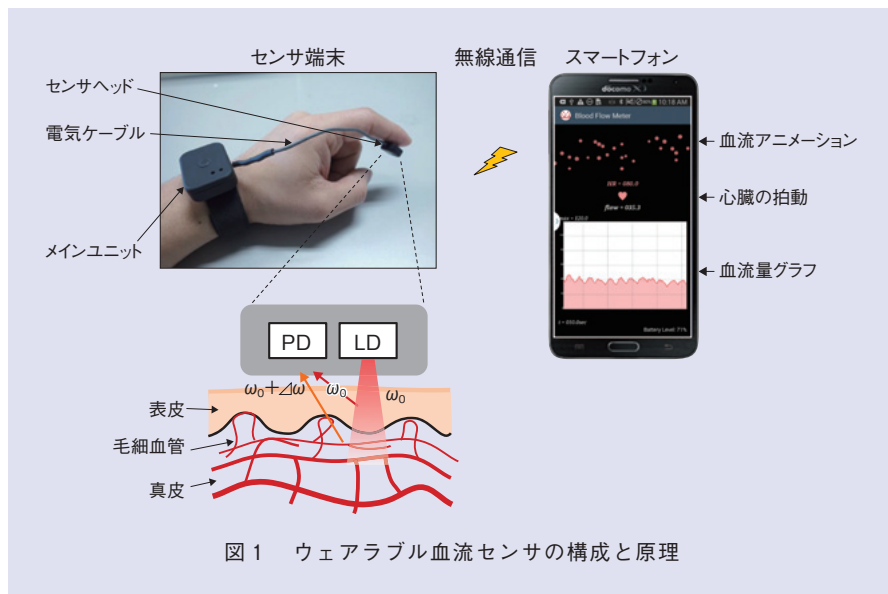


図1 ウェアラブル血流センサの構成と原理

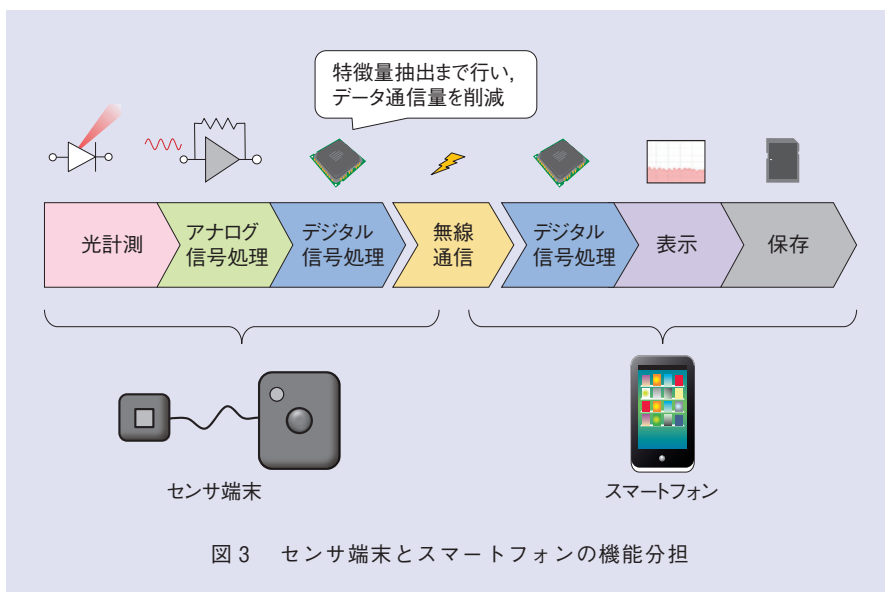
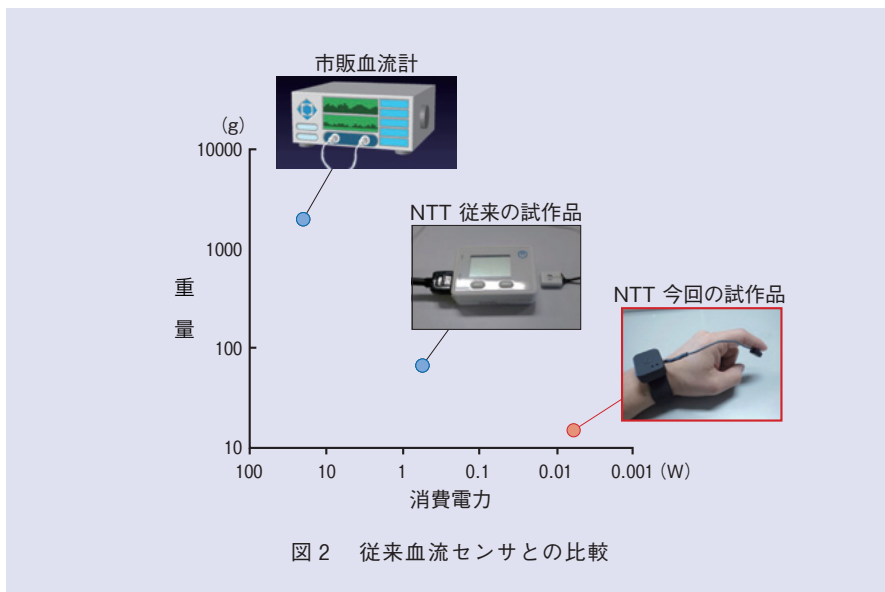
管内を移動する赤血球に当たって散乱する光は、光のドップラー現象により、赤血球の移動速度に比例した周波数シフトを生じるため、検出した信号の周波数スペクトルを分析することにより、血液の流れに関する情報を取得することができます⁽⁴⁾。スマートフォンではこの情報を基に、血流量^{*}のグラフ描画や、血液の流れや心臓の拍動のアニメーション表示といった視覚化を行います。

今回開発した血流センサの重量や消費電力を、NTTの従来試作品や、市販の血流計と比較した結果を図2に示します。NTTの従来試作品は、市販の血流計と比較して重量が約30分の1、消費電力が約40分の1と大幅な小型化、低消費電力化を達成していました。今回の試作品はそこからさらに、約4分の1の軽量化、約100分の1の低消費電力化を達成し、日常生活を送りながら、1日の血流変化を連続的にモニタリングするといった使い方が初めて可能となりました。このような大幅な小型化、低消費電力化を達成できた理由は大きく2つあります。1番目の理由は、スマートフォンとの連携を前提としたシステム設計により、従来はセンサ端末側に搭載されていた機能の一部をスマートフォンと分担できるようになったことです。2番目の理由は、回路や信号処理の工夫によって、血流センサを高速に間欠動作させて効率的な動作を実現したことです。以下、これらの技術について紹介します。

スマートフォンと連携したシステム設計技術

血流センサには、光計測、アナログ信号処理、デジタル信号処理、解析結

^{*} 血流量：血球の速度と血球の数の積の総和に相当する量。



果の表示、保存などの機能が必要です。従来は、センサ端末がこれらの機能をすべて担う必要がありました。ところが、近年はスマートフォンが普及したことにより、状況に大きな変化が生じています。スマートフォンには、高性能なプロセッサや、高精細なディスプレイ、大容量のメモリ、通信機能などが搭載されているので、これらの機能を積極的に活用することにより、センサ端末には必要最小限の機能のみを搭載すればよくなりました。このように、

スマートフォンと一体となって機能するセンサは、近年「アプリセサリ」(ApplicationとAccessoryを組み合わせた造語)と呼ばれ、センサ開発における新たな潮流となっています。

センサ端末の小型化、低消費電力化を実現するためには、センサ端末とスマートフォンの機能分担の最適化が重要です。図3は、今回試作した血流センサにおける機能分担のイメージです。センサ端末では、光計測によって取得した生データを、増幅、フィルタ

リング、サンプリングし、デジタル信号処理で特徴量を抽出するまでの処理を実施します。その後の高度なデジタル信号処理や、解析結果の表示、保存などはスマートフォンが担当します。センサ端末では、計測した生データを加工せずにスマートフォンに送信したほうが、データ処理量は減りますが、一方で通信量が増えるというトレードオフがあります。そこで、上記のようにセンサ端末側で生データの特徴量を抽出してから送信することによって、通信量を100分の1以下に削減し、センサ端末の消費電力を最小化しています。

間欠動作による低消費電力化技術

従来の血流センサと、今回試作した血流センサの動作と消費電力のイメージを図4に示します。従来の血流センサでは、測定中、レーザーは常時発光し続けており、アナログ回路やデジタル回路も連続的に動作して、測定結果を頻繁に送信していました。今回試作した血流センサでは、大幅な低消費電力化を達成するため、血液の流れから得られる信号の特性を詳細に分析し、効率的な測定動作を実現しています。具体的には、レーザーを間欠的に短時間のみ発光させるとともに、アナログ回路もレーザーと同調して間欠的に動作させ、短時間で信号の増幅、フィルタリングを行います。デジタル回路も、信号をサンプリングして特徴量を抽出すると、すぐにスリープモードに移行して消費電力を削減します。さらに、無線通信についても、間欠的な通信により低消費電力で動作可能なBluetooth Low Energy (BLE) という通信方式を採用しました。BLEは、Androidではバージョン4.3から搭載された新しい通信方式です。1パケット当たり最大

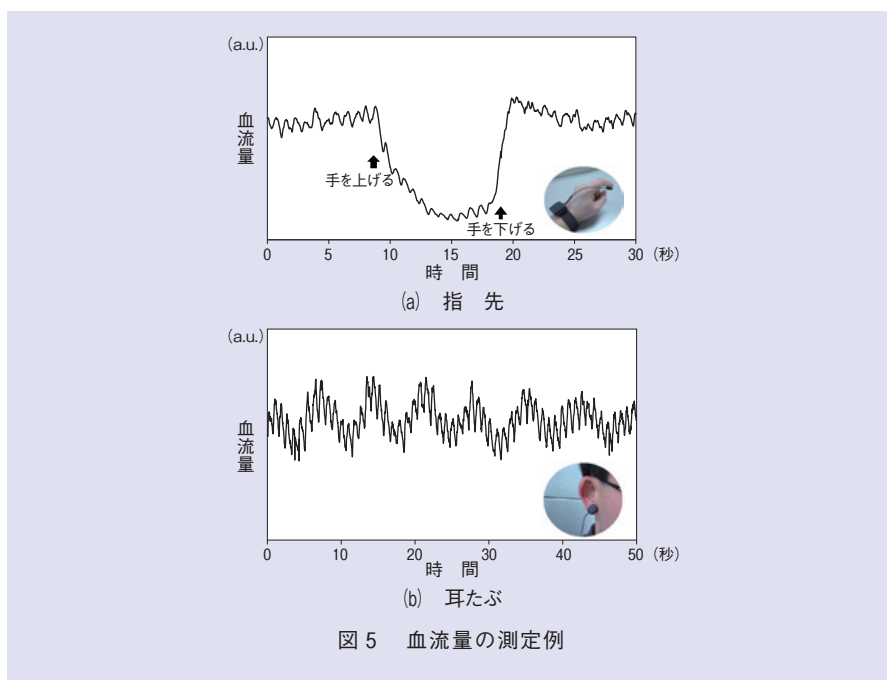
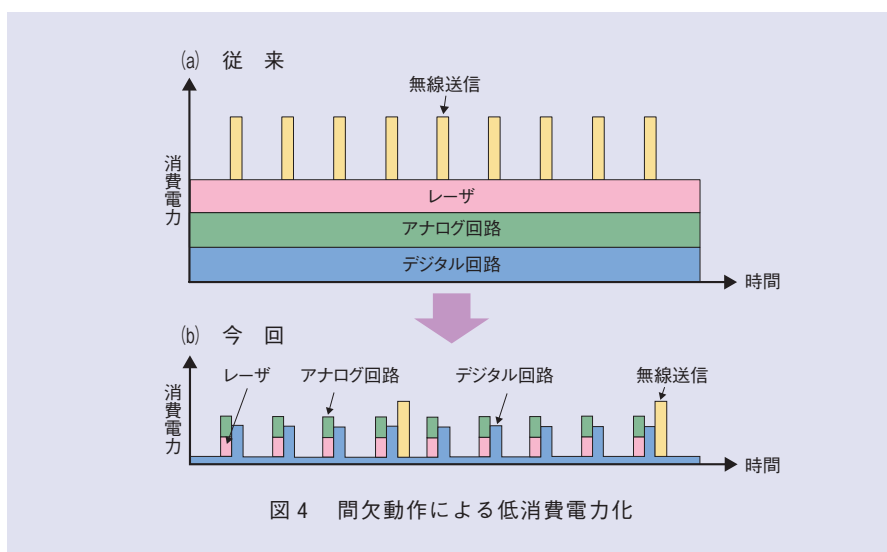
約20 Byteという小さなデータを必要となるときのみ送信することによって、従来のBluetoothと比較し大幅な低消費電力化が可能です。今回試作した血流センサでは、BLEの通信能力を最大限活かすべく、測定したデータをすぐには送信せずいったんバッファに蓄積し、パケットが一杯になったタイミングで一括して送信することによって、効率的な通信を行っています。以上のように、光計測、アナログ信号処理、

デジタル信号処理、無線通信のすべての処理を間欠的に実行することによって、消費電力を大幅に削減し、小さなバッテリーでも長時間にわたって血液の流れをモニタリングすることが可能となりました。

血流量の測定例

本血流センサを用いて血流量を測定した例を紹介します。

図5(a)は、指先に血流センサを取



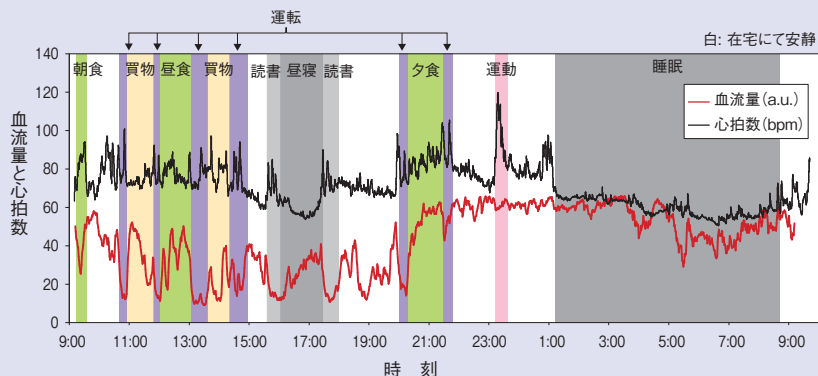


図6 日常生活における24時間モニタリング

り付け、腕を上げ下げした場合の血流量の測定結果です。重力の影響により、腕を上げると指先の血流量が低下し、腕を下げると回復することが分かります。このように、人の血液の流れは日常的な行動によってダイナミックに変化しています。

図5 (b)は、耳たぶの血流量を測定した結果です。耳たぶの血流量には、約1秒間隔と約10秒間隔の周期的な揺らぎが存在しています。約1秒間隔の揺らぎは心拍に対応しており、約10秒周期の揺らぎはバソモーションと呼ばれる血管の収縮運動の影響を表しています。これらの揺らぎは、運動やメンタルなどの影響で変化することが知られており、さまざまな応用が検討されています⁽⁵⁾。

図6は、日常生活における血流量を24時間連続して測定した結果です。ウェアラブル生体電極hitoe⁽⁶⁾を用いて心拍数を同時測定した結果も併記しています。運転や食事、睡眠などの日常行動が血液の流れに与える影響が見て取れます。このような測定を行うことによって、例えば血行不良に起因した体の不調に悩まれている方が、日々の生活の中で血行を改善するためのヒントが得られる可能性があります。日

常生活を営みながら長時間にわたって血流を測定することは従来の血流センサでは不可能でしたが、今回試作した血流センサの小型、低消費電力という特長によって初めて実現することができました。

今後の展開

血液の流れは、心身の状態に応じてダイナミックに変化しており、豊富な情報を含んでいます。血液の流れをいつでもどこでも測定できるウェアラブル血流センサの応用分野は、日常的な血行モニタリングや、在宅医療、美容、スポーツなど多岐にわたります。私たちは、これらの分野で強みを持つ企業や大学などのパートナーとのコラボレーションを積極的に進め、人々の健やかで活動的な生活を支援するサービスを創出していきたくと考えています。

参考文献

- (1) E. Bianconi, A. Piovesan, F. Facchin, A. Beraudi, R. Casadei, F. Frabetti, L. Vitale, M.C. Pelleri, S. Tassani, F. Piva, S. Perez-Amodio, P. Strippoli, and S. Canaider: "An estimation of the number of cells in the human body," *Annals of Human Biology*, Vol.40, No.6, pp.463-471, 2013.
- (2) 後山: "冷え症の病態の臨床的解析と対応—冷え症はいかなる病態か、そして治療できるのか," *医学のあゆみ*, Vol.215, No.11, pp.925-929, 2005.
- (3) 清倉・美野・嶋田: "常時携帯可能な超小型レーザ血流計," *NTT技術ジャーナル*, Vol.17,

No.11, pp.24-27, 2005.

- (4) R. Bonner and R. Nossal: "Model for laser Doppler measurements of blood flow in tissue," *Applied Optics*, Vol.20, No.12, pp.2097-2107, 1981.
- (5) 向江・望月・谷口: "皮膚血流のリズムを用いた心身状態評価の研究," *日本生理人類学会誌*, Vol.11, No.2, pp.81-86, 2006.
- (6) 高河原・小野・小田・勅使川原: "業界の垣根を超えて結実したウェアラブルセンサ—hitoe技術," *NTT技術ジャーナル*, Vol.26, No.5, pp.42-44, 2014.



(左から) 笠原 亮一/ 小泉 弘/
桑原 啓/ 樋口 雄一

小さな血流センサの中には、先進のテクノロジーと大きな応用の可能性が詰め込まれています。血流という情報の価値を高め、血流センサが人々の暮らしを支えるツールとなるよう、研究開発を続けていきます。

◆問い合わせ先

NTTデバイスイノベーションセンター
ライフアシストプロジェクト
ヘルスケア応用DP
TEL 046-240-2717
FAX 046-270-2323
E-mail kuwabara.kei@lab.ntt.co.jp