

博士論文（要約）



# Development of wearable energy harvester based on triboelectric nanogenerator

(摩擦帯電に基づいた  
ウェアラブルエネルギーハーベスターの開発)

指導教員 金 範俊 教授

東京大学大学院 工学系研究科 精密工学専攻

学生証番号 37-177239

蘇 萌

---

過去数十年の間に、電子機器は急速な発展により、人々の日常生活に欠かせない部分となってきた。特に、「Internet of Things」が情報化の主流になった今、さまざまなセンサーがより包括的な情報とサービスを提供し始めている。「トップダウン」製造技術の進歩に伴い、電子機器やセンサーの寸法は大幅に減少する一方で、より重要な機能を連続的に提供していく傾向がある。しかし、電源コンポーネントとして常に第一選択肢に使用されたバッテリーは、特に環境の安全性と統合の容易さの観点から、急速に小型化および多様化する電気デバイスシステムの要求を満たすことがますます難しくなっていく。ウェアラブルデバイスは、社会と日常生活の利便性と安全性の向上という点で大きな発展の見通しがあり、間違いなく電源コンポーネントのウェアラビリティに厳しい要件を課す。接触帯電と静電誘導の組み合わせに基づく摩擦帯電発電機（**TENG: Triboelectric Nanogenerator**）は、体の動きからの機械的エネルギーを電気エネルギーに効果的に変換できる。環境への配慮、経済性、構造の多様性といった利点により、**TENG** はバッテリーを代わって、ウェアラブル発電システムの有望なソリューションになった。

**TENG** の動作メカニズムは主に外部の振動と摩擦に依存しているため、局所的な機械的エネルギーを収集するために、衣服に統合されたり、身体のだこかに装着したりすることがよくある。主な製造方法は、**coating** と **weaving** の 2 種類に分けられている。**Coating** は、必要な摩擦材料と電極材料を層状に統合することである。**Weaving** とは、電極の金属コアを備えたポリマーワイヤーを織物の形に織ることである。現在、ウェアラブル **TENG** の分野の発展ボトルネックはいくつかある：一番目は、現在の製作方法の適応性が弱いこと。**Coating** 方法において、基材、コーティングされた材料、および処理条件に対する要件は、一般に高くなる。実際の応用では、人々が日常生活で馴染んでいる多くのウェアラブル材料は、処理に適さない理由で排除されることが多い。さらに、「摩擦材料の表面に一層の電極材料を置く」という単純な層状構造を持っているデバイスは、片側からしか機械的エネルギーを収集できない。多層構造である場合、材料の過剰な蓄積は柔軟性の欠如を引き起こし、さらに処理の複雑化を引き起こす可能性がある。もう一つの **weaving** 方法においても、必然的に **TENG** をかさばらせ、着装や一体化、統合には負担がかけられる。その次の製織工程も複雑で、高コストにつながる。製作方法の他に、二番目の問題は、原材料の選択が徐々に単一になり、日常からますます遠ざかる傾向があること。摩擦材料のほとんどは工業用合成材料であり、柔らかくも通気性も十分ではない。電極の場合、金属が常に最初の選択肢であり、アレルギーのリスクを課すだけでなく、着用されて安全または快適に目指すことが難しい。他には、もう一つの問題は、**TENG** の構造のカスタマイズはあまり可能でもなく、ただ指定された発電モードに制限されていること。摩擦はさまざまな形でいつでも発生する可能性があるが、普通、**TENG** の設計は同時に複数の状況に適応できない。最後の問題は、適用可能性を決定する高発電出力は、実際に必要とされる他の特性と共存することが困難であること。言い換えれば、低コスト、シンプルな構造及び製造プロセス、日常的なウェアラブル素材、と高出力を同時に満たすことが難しい。それが **TENG** テクノロジーの普及を制限する理由なのである。

本研究では、カーボンナノチューブ（**CNT**）とシルクのハイブリッドミックスに基づいたシンプルな構造を備えたウェアラブル **TENG** が開発された。2 つの天然生分解性材料、シルクと **CNT** は、それぞれ摩擦電気材料と電極材料として使用された。該当分野において、摩擦材と電極材の混合による高効率のウェアラブル **TENG** を実現するのは初めてである。この 2 つの材料の組み合わせ、できた混合膜の構造、および製作処理方法・流れは全てここで新たに開発されたので、今後ウェアラブル **TENG** の開発に参照される価値がある。二つの製作処理方法が提案され、それに応じ

---

て、混合膜の内部構造と特性が異なる 2 種類の TENG が作成された。1 つは、注型成形によって作成された混合膜型 TENG であり、もう 1 つは、エレクトロスピンニングとエレクトロスプレーを組み合わせで作成された繊維基材 TENG である。

既存のボトルネックへの解決として、まずに、開発された TENG の原材料の処理と製造方法は高い適応性を備えている。シンプルで低コストの生産により、同じシンプルで低コストのデバイスが製作され、加工された材料特性に対する特定の要件なしに、通常の温度と湿度の環境で実行できる。第二に、原材料の選択は、実用性、安全性、経済性の概念に準拠している。シルクの天然フィブロインは肌にやさしく、日常的に服の原材料やスキンケア器具として使用されている。電極材料として使用される CNT は、単純な組成と優れた性能を備えている。これらを組み合わせることにより、高出力のウェアラブル電源が実現された。さらに、開発された二つの構造の TENG とも、軽量、薄型、自由な使用という要件に達している。別個独立の発電装置として着用することもでき、衣類や他のシステムに統合することもでき、着用負担はほとんどない。膜型構造は、簡単にカスタマイズでき、コンデンサを充電したり、マイクロニードルカプセルに統合して、医療効果のために微小電流を放出したりできる。繊維基材構造はより強い弾性と引張能力を持っているので、指で着用してランダムに皮膚に触れ、キーボードをタップし、ペンを握って字を書くことで、湿度温度計を駆動することもできる。また、より大きな面積の場合、手首に独立で着用するか、衣類に縫い付けることも達成された。各場合のコンデンサの充電曲線によれば、キーボードをタップするたびに得られる平均電力は 10.78 nW であり、ペンを握るたびに得られる平均電力は 11.979 nW であると概算できる。このランダムな動きによって、もはやマイクロセンサーノードの電力ニーズに満たしている。スケールのカスタマイズは、TENG の適用性を評価するために非常に重要である。使用可能電気エネルギーを提供しながら 1~20 cm<sup>2</sup> に加工できることが、装着性を満足すると評価された。最後に、TENG の出力は、面積に関係なく出力が 100 μW を超えるという事前設定された目標に達し、該当分野において代表的でもある。本研究では、周期的な振動台パッチングとランダムハンドパッチングのもとで、ポリエチレンテレフタレート (PET) フィルムと接触することにより、電気的特性が調査された。膜型構造の出力電力は、振動台で 190.73 μW/cm<sup>2</sup>、ハンドパッチングで 285.91 μW/cm<sup>2</sup> に達し、内部抵抗は 30MΩ と推測された。また、繊維基材構造は、振動台で 140.99 μW/cm<sup>2</sup> に達し、ハンドパッチングで 317.4 μW/cm<sup>2</sup> に達した。さらに、最初に確立された「50,000 サイクルを超える作業で破壊的な欠陥がない」という耐久性の目標も達成された。開発された混合膜は、75,600 サイクルの連続操作条件下で優れた安定性を示し、電圧は 16.7% しか低下しなかった。

本研究で開発された TENG 及びその素材、構造と各製作処理方法は、ウェアラブル TENG の開発ボトルネックを打破するための信頼できる基礎を築くことができた。さらに、本研究で述べられた経験を参考にして、さまざまな要件に応じて、多様なカスタマイズを簡単に行うことができ、将来の開発により幅広い材料とアプリケーションが検討できる。