

## 審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 蘇 萌 (ス メン, Su Meng)

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。

「マイクロ・ナノ」製造技術の進歩に伴い、電子機器やセンサの寸法は勿論、消耗電力も大幅に小さくなる一方で、より複雑な機能を集積化し、継続的な機能の提供が必要になっている。しかし、駆動電源として、常に第一選択肢に使用されたバッテリーに関しては、最近の環境問題と使用面での容易さ（交換、充電、集積化など）の観点から、急速に小型化および多様化する電子デバイスやセンサーらの仕様条件を満たすことがますます難しくなっている。特に、ひとのウェアラブルデバイスは、日常生活への利便性と人への安全性の確保という点で今後、大きな発展と共に、間違いなくその駆動電源要素のウェアラビリティについても厳しい要件が生じる。接触帯電と静電誘導の現象に基づく摩擦帯電発電機 (TENG, Triboelectric nano generator) は、摩擦、振動など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候補技術の要素になれる。

本研究では、カーボンナノチューブ (CNT) とシルクフィブロインの混合液を作製し、そのハイブリッド素材を用いてシンプルな構造を備えたウェアラブル TENG (摩擦帯電) デバイスを開発、様々なウェアラブルエネルギーハーベスターへの応用例を示した。天然繊維状のタンパク質の一種であるシルク素材と CNT は、それぞれ摩擦帯電材料と電極材料として使用された。なお、エネルギーハーベスターの研究開発分野、特に摩擦帯電デバイスの分野において、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 つの材料の混合率の最適化、混合膜の構造、および製作処理方法の提案から得られた新たな識見、かつ製作した TENG デバイスの評価まで、その開発の新規性と独創性は優れたものであり、今後のウェアラブル TENG デバイスの応用に非常に期待される。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 デバイスを作製した。1 つは、注型成形によって作製した混合膜型 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製した繊維基材 TENG である。

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、実装の単純化の実現により、応用への可能性が高い、使用の高自由度という要件に達している。独立の発電装置として着用することも、衣類や他のシステムに融合することもでき、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、コンデンサを充電できていた。マイクロニードルカプセルに融合して、医療応用のために微小電流を放出できることも確認した。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、例えば、指先に着用してランダムに皮膚に触れ、キーボードをタップしたり、ペンを握って字を書くことなどの人間の動きに対して、湿度温度計などのセンサーを十分駆動できることも確認できた。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可能である。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源としての必要発電量に満たしている。スケールのカスタマイズは、TENG の適用性の観点から非常に重要である。使用可能電気エネルギーを提供しながら 1~20 cm<sup>2</sup> の面積まで加工できることで、装着性を考慮した上で、十分汎用できる可能性を持つと言える。本研究では、周期的な振動台または人の手によるパッティング（繰り返しの接触動作）のもとで、ポリエチレンテレフタレート (PET) フィルムとの摩擦帯電を起こし、その電気的特性を調べた。膜型構造の出力電力は、振動台で 190.73 μW/cm<sup>2</sup>、ハンドパッティングで 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>、ハンドパッティングで 317.4 μW/cm<sup>2</sup> に達した。本研究において、「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。作製した混合膜は、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 デバイスの開発における既存の問題点（両立できなかった、高発電効率性と材料の親和性、加工性等）を解決できる基盤を築くことができ、本研究で述べられた作動モードに基づいて、より幅広い材料との融合、新たな応用への展開が期待できる。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。