OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	超生体親和ウェアラブルデバイス実現に向けた金ナノワイヤによる柔軟・伸縮エレクトロニクス
Author(s)	髙根, 慧至
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/96049
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　髙根慧至　）	
論文題名	**超生体親和ウェアラブルデバイス実現に向けた金ナノワイヤによる柔軟・伸縮エレクトロニクス**

論文内容の要旨

柔軟・伸縮デバイスは実装対象物のあらゆる形状・動作に適合し、従来にない多種多様な場面・用途での活用を期待される優れた次世代技術である。これまで柔軟・伸縮デバイスの電極・配線を構築する材料として、銀ナノワイヤに代表される金属ナノワイヤが一般的に用いられてきた。金属ナノワイヤは、それらがランダムに散らばるネットワーク構造の電極を形成し、優れた柔軟・伸縮性と導電性を両立できる。

近年では高齢化社会の進行から、ヘルスケア向けの柔軟・伸縮ウェアラブルセンサの開発に期待が高まっている。しかし従来の柔軟・伸縮電極材料である銀ナノワイヤは生体適合性に乏しく、生体と直に接するウェアラブセンサ電極には適していない。そこで新たに金ナノワイヤ（AuNW：Gold Nanowire）が注目され始めている。AuNWは銀ナノワイヤにない生体適合性が期待できウェアラブルセンサ電極材料として有望である。しかし現状、銀ナノワイヤに比べてAuNWを用いた柔軟・伸縮な電極・配線およびデバイスに関する研究規模は小さく報告例は少ない。そのためAuNWネットワーク電極・配線は未だセンサ実装に必要な性能に達しておらず、デバイス応用でも遅れをとる。そこでAuNWを用いたウェアラブルセンサ実現のためには、AuNW単体（単一AuNW）の電気的特性評価・解析から、高性能なAuNWネットワーク電極の実現、それらを用いたデバイス実装など広範囲に及ぶ取り組みが求められる。これらを踏まえ、本論文では「単一AuNWにおける電流-電圧・ノイズ特性評価・解析」、「伸縮AuNWネットワーク電極の導電特性向上・メカニズム解析」、「AuNWネットワーク電極を用いた柔軟有機薄膜トランジスタの開発」を行った。

第1章では本論文における取り組みに先立ち、柔軟・伸縮な電極・配線を構築する代表的な導電材料を紹介した。

第2章では高導電率・低ノイズのAuNWネットワーク電極作製の指針構築に向け、電極を構成する単一AuNWの電気的特性評価・解析を行った。正確な単一AuNWの特性評価のため、1本のAuNW上に4つの測定端子を形成した4端子法測定用電極を作製した。電流-電圧特性評価から、単一AuNWは線形抵抗特性とともにバルクAuより高い抵抗率を示すことが確認された。また単一AuNWとAuNWネットワーク電極のノイズ特性評価から、単一AuNWに比べてネットワーク構造ではそのノイズレベルが増加することが確認された。これらの結果を解析することで、単一AuNWおよびAuNWネットワーク電極の電気抵抗・ノイズの支配的な要因を明らかにし、電極の高導電率・低ノイズ化の指針を示した。

第3章では伸縮AuNWネットワーク電極の高性能化に向け、AuNWネットワーク構造にマクロスケールのメッシュ構造を導入した「メッシュAuNWネットワーク電極」を開発し、その導電特性評価・メカニズム解析を行った。特性評価から、メッシュ構造導入によって電極伸縮時の規格化抵抗値変化が抑制されるとともに、異なるメッシュ構造の電極はそれぞれ異なる抵抗値変化を示すことが確認された。またAuNWネットワークの微視的構造観察と微細構造解析モデルによって、メッシュAuNWネットワーク電極における抵抗値変化のメカニズムを明らかにした。

第4章ではメッシュ構造導入で生じる絶対抵抗値/シート抵抗値増加の問題解決に向け、金属ナノワイヤ-金属薄膜ハイブリッド構造とメッシュ構造と組み合わせた「メッシュAuNW-Au薄膜ハイブリッド電極」を開発し、その導電特性の評価・メカニズム解析を行った。特性評価から、メッシュ・ハイブリッド構造導入によって電極伸縮時のシート抵抗値および規格化抵抗値変化が同時に低下することが確認された。またメカニズム解析からハイブリッド構造によってシート抵抗値が、メッシュ構造によって規格化抵抗値変化が低下することを明らかにした。

第5章ではAuNWを用いた柔軟・伸縮デバイス実現の可能性とそれに向けた指針を示すため、AuNWネットワーク電極を用いた柔軟有機薄膜トランジスタ（Organic Thin-Film Transistor：OTFT）を開発した。作製したOTFTは、正常な電流-電圧特性を示すとともに、接触抵抗は従来のAu薄膜電極に比べて1/10程度に減少した。接触抵抗の低減によってトランジスタの性能を示す実行移動度がAu薄膜電極の場合に比べて向上することが確認された。さらに作製したOTFTでは曲げ変形前後でその電流-電圧特性に変化がなく、優れた機械的柔軟性を有することが示された。

本論文で示すAuNWに関する包括的な成果は、AuNWを活用した柔軟・伸縮エレクトロニクスの科学的知見を深めるとともに、当該分野のさらなる発展に貢献すると期待される。

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　高根慧至　）		
	（職）	氏　名
論文審査担当者	主査　教授　関谷　毅 副査　教授　小林　慶裕 副査　教授　坂本　一之 副査　教授　家　裕隆	

論文審査の結果の要旨

本論文は金ナノワイヤ（AuNW：Gold Nanowire）を用いた生体親和性の高いウェアラブルセンサの実現に向けて、AuNW単体（単一AuNW）の電気的特性評価から、伸縮AuNWネットワーク電極の作製および高性能化、AuNWネットワーク電極を用いたデバイス実装まで、柔軟・伸縮エレクトロニクス分野のAuNWに関する包括的な取り組みをまとめたものである。

第1章では上記取り組みに先立ち、柔軟・伸縮な電極・配線に焦点を当ながらこれらを構築する代表的な導電材料を紹介している。またウェアラブルセンサ電極材料に求められる電気的・化学的・機械的特性といった観点から各材料の利点・欠点を比較している。この比較によってAuNWがウェアラブルセンサ向けの柔軟・伸縮電極材料として優れていることを明らかにするとともに、単一AuNWおよびAuNWネットワーク電極の特性計測・評価・デバイス応用を行う本論文の目的・意義を説明している。

第2章では高導電率かつ低ノイズレベルの柔軟・伸縮AuNWネットワーク電極の構築に向けて、それらを構成する単一AuNWの電気的特性の評価・解析を行っている。ここでは正確な特性評価のため1本のAuNW上に4つの測定端子を形成した4端子測定用電極を作製し、これを用いて単一AuNWの電流-電圧特性およびノイズ特性の評価を行っている。測定の結果、単一AuNWの電流-電圧特性は線形抵抗としての特性を示すとともに、その抵抗率はバルクAuの理論値よりも高い値となることを確認している。これはAuNW幅がAu固体中の電子の平均自由行程よりも小さくなることで電子界面非弾性散乱による抵抗率上昇の影響が顕著になったためだとしている。また単一AuNWとAuNWネットワーク構造のノイズ特性を評価し、単一AuNWに比べネットワーク構造ではそのノイズレベルが増大することを確認している。この結果から、AuNWネットワーク電極における支配的なノイズ源はAuNW内ではなくAuNW間コンタクト部分の電気伝導であることが示唆されるとともに、コンタクト部の改良がAuNWネットワーク電極のノイズ低減の指針になることを明らかにしている。

第3章では伸縮AuNWネットワーク電極の高性能化に向け、マクロスケールのメッシュ構造をネットワーク構造に導入した「マクロメッシュAuNWネットワーク電極」を開発し、その歪み-導電特性の評価およびメカニズム解析を行っている。AuNWネットワーク電極にメッシュ構造を導入することでその規格化抵抗値変化を抑制できるとともに、異なるメッシュ構造ごとに異なる抵抗値変化を示すことを確認している。電子顕微鏡を用いたAuNWネットワーク構造の微視的構造観察、微細構造解析モデルによる歪み-導電特性の解析によって、マクロメッシュAuNWネットワーク電極ではそのメッシュ形状の伸長方向成分の大きさが規格化抵抗値変化の支配的要因であることを明らかにしている。

第4章ではメッシュ構造導入で生じる絶対抵抗値/シート抵抗値の増加という課題を踏まえ、AuNWネットワーク電極におけるシート抵抗値および規格化抵抗値変化を同時に低減するため、金属ナノワイヤ-金属薄膜ハイブリッド構造とマクロメッシュ構造と組み合わせた「メッシュAuNW-Au薄膜ハイブリッド電極」を開発し、その歪み-導電特性の評価・メカニズム解析を行っている。メッシュ・ハイブリッド構造を導入することで、通常のAuNWネットワーク電極に比べてシート抵抗値および規格化抵抗値変化を同時に抑制できることを確認している。またメカニズム解

析を行うことで、ハイブリッド構造におけるAu薄膜によってシート抵抗値が抑制されるとともに、メッシュ構造によって電流に対するクラックの影響を相対的に低減することで規格化抵抗値変化が抑制されることを明らかにしている。

第5章ではAuNWを用いた柔軟・伸縮デバイス実現の可能性を示すため、AuNWネットワーク電極を用いた柔軟有機薄膜トランジスタ（Organic Thin-Film Transistor：OTFT）を開発し、その電気的・機械的特性の評価を行っている。ソース・ドレイン・ゲート電極にAuNWネットワーク電極を用いたOTFT（AuNW-OTFT）は、正常なトランジスタの電流-電圧特性を示すとともに、ソース・ドレイン電極と有機半導体の間の接触抵抗は、従来のAu薄膜電極を用いた場合と比べて1/10程度に減少することを確認している。また同時に接触抵抗の低減によってトランジスタの性能を示す実行移動度が、Au薄膜電極の場合に比べて向上することを確認している。さらにAuNW-OTFTを半径0.8 mmのガラス棒に巻き付け曲げ歪みを加えた際、曲げ変形前後でその電流-電圧特性にほぼ変化はなく、開発したAuNW-OTFTが優れた機械的柔軟性を有することを明らかにしている。AuNWネットワーク電極は優れた伸縮性を有することから、今後のAuNW-OTFT伸縮化の可能性についても期待される。

第6章では論文全体のまとめと今後の展望を述べている。

以上を要するに、本論文はAuNWを用いた柔軟・伸縮ウェアラブルデバイス実現に向け、AuNWネットワーク電極の高性能化とデバイス応用の指針を示している。まず電極を構成する単一AuNWの電気的特性を明らかにすることで、AuNWを用いる電極の高導電率・低ノイズ化の指針を示している。次に新規構造設計によって伸縮AuNWネットワーク電極の高性能化を実現するとともにそのメカニズムを示している。さらにAuNWネットワーク電極を用いて柔軟OTFTを開発し、その優れた電気的・機械的特性とその要因を示している。本論文で示されたAuNWに関する包括的な研究成果は、応用物理学における科学的知見を深め、工学分野における貢献は大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。