

氏 名	おう ちょ 王 儲
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	博 1 1 7 1 号
学位授与の日付	令和 7 年 3 月 21 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研 究 科 ・ 専 攻	工芸科学研究科 設計工学専攻
学 位 論 文 題 目	A Study on Triboelectric Film Sensor for Integrity Monitoring of Bolted Joints (ボルト締結部の健全性モニタリングのための摩擦帯電を用いたフィルムセンサーに関する研究)
審 査 委 員	(主査)教授 増田 新 教授 村田 滋 教授 射場 大輔 准教授 三浦奈々子

論文内容の要旨

本論文は、摩擦帯電効果を利用してボルト締結継手の完全性を評価するフィルム状の自己発電型センサの提案と開発および評価について記載された 7 章から構成される論文である。

機械や構造物において多用されるボルト締結では、ボルトとナットの締め付けによって生じる圧縮力すなわち締結力によって対象物が締結される。ボルト締結には使用中にボルトの緩みにより締結力が失われるリスクが常に伴うため、定期的な点検保守が必須である。本研究で提案するのは、現状人手による点検に依存しているボルト締結継手の完全性評価を自動化するための常時監視用センサーへの新規なアプローチであり、摩擦帯電により異種の材料の接触界面に生じる電荷が、表面の分離により静電誘導を生じさせることに着目したセンサーの提案と実験的評価、および実験結果を説明するモデリング研究を示したものである。

まず、引張方向の振動外力が作用するボルト継手を対象として、センサーの基本原理が提示された。初期のセンサーは樹脂材料と電極および絶縁層を積層したフィルム 2 種 (PET-Cu-PI および PI-Cu-PI) をリング形状に成形して重ね合わせたものであり、被締結体の間に挟んで用いられる。電気的には、このセンサーは接触する樹脂材料間における電荷の移動によってチャージされたコンデンサーである。ボルト締結部に振動外力が印加されると、締結力の微小な変動により接触面間に微小な相対運動が生じる。センサーはこの運動によって電極間に誘導される電圧変動を検出することを企図しており、ボルト緩みによる締結力の低下によって相対運動の振幅が増加することを電圧振幅の変化として捉える (2 章)。続いて、センサーを組み込んだ鋼材製の締結体を軸方向加振する実験が行われた。締結力を増加させながらセンサー出力電圧振幅を計測した結果、予想に反して、電圧振幅は最初顕著に減少した後、その後増加して再び減少するという推移を示した (3 章)。この結果を説明するために、PET 層-PI 層間および絶縁層-被締結体間の摩擦帯電効果と静電誘導、接触界面における層間変位変動の力学モデルと、締結力に依存した古典的な粗面間接触剛性モデルを統合した数学モデルを構成した。その結果、初期のセットアップにおいては PET 層-PI 層間および絶縁層-被締結体間の誘導電圧が互いを相殺していることが明らかになった。外部回路の変更によりこの問題は解消し、締結力の増加に対して概ね単調に出力電圧が減少する結果を得た。さらにこれらの実験結果を用いて接触面における摩擦帯電の電荷密度の推定が

行われ、想定された接触力学モデルと整合することが示された（4章）。

次に、初期のセンサーに対して二つの着眼点に基づく改良設計が提示された。一つ目は、2種の樹脂層間ではなく、樹脂層と被締結体との間の摩擦帯電効果を利用することである。これにより、センサーを2つのフィルムの重ね合わせではなく、単一の PI-Cu-PI 積層フィルム構成にすることができる。二つ目のアイデアは、センサーを標準的な FPC 基板として製造することで、これにより、正確かつ安価にセンサーを製造することが可能になった。提案されたセンサーを引張継手に組み込んだ加振実験により、締結力とセンサーの出力電圧振幅が低荷重域で反比例することが示された。この結果を説明するために、PI 層-被締結体間の摩擦帯電効果と静電誘導、接触界面における層間変位変動の力学モデルと、Persson の接触理論を採用した粗面間接触力学モデルに基づく真実接触面積変動と接触剛性モデルを統合した数学モデルを構成した。モデルは低荷重域における実験結果をよく説明し、高荷重域における急激な電圧振幅減少とも定性的に一致する結果を示した（5章）。

続いて、改良型センサーのせん断継手における適用可能性を評価するための予備的な実験研究が示された。ボルト締結された板状の被締結物に落錘を衝突させせん断方向に衝撃力を与える落下試験が実施され、締結力とセンサー出力電圧との関係が調査された。出力電圧のピークレベルが締結力の増加とともに減少する傾向が明らかになり、せん断継手の完全性評価においても本センサーが有効である可能性が示唆された。さらにスライディングモード摩擦帯電デバイスの数学モデルの適用が示唆されたが、実験結果と一貫して一致する理論モデルはまだ見つかっておらず、適切なモデルに基づいた現象の理解が今後の研究課題として挙げられた（6章）。

最後に、本研究においてなされた提案と得られた知見がまとめられ、研究が総括された（7章）。

論文審査の結果の要旨

本論文は、ボルト締結継手の完全性評価を自動化するための常時監視用センサーへの新規なアプローチを提案したものである。センサーの基本設計と引張継手における動作原理および合理的な数学モデルによる記述を確立し、さらにセンサー構成と製造の簡便化およびせん断継手への適用の可能性を示した。

最終的に提案された改良型センサーは単一の PI-Cu-PI 積層フィルムをリング形状に成形した単純な構造であり、フレキシブルプリント基板として製造される。このセンサーは金属製の被締結体間に挟んで用いられ、ボルト締結体に作用する動的負荷によって接触面間に生じる微小な相対運動を被締結体とセンサー電極との間の電圧変動として捉えることができる。センサーの出力電圧振幅は締結力に対して単調に減少する依存性を示し、低荷重域では反比例、高荷重域では急激に減少する。このことは、電圧振幅の監視によるボルト緩み評価の可能性を示唆するものである。

さらに、この結果を説明するために、PI 層-被締結体間の摩擦帯電効果と静電誘導、接触界面における動的な層間変位変動の力学モデルと、Persson の接触理論を採用した粗面間接触力学モデルに基づく真実接触面積変動と接触剛性モデルを統合した数学モデルを提案し、モデルが低荷重域における実験結果をよく説明し、高荷重域における急激な電圧振幅減少とも定性的に一致することを示した。このことは、センサーの動作原理に対する適切な理解への到達を示しており、今

後の研究発展への基礎を確立するものであるとともに、ボルト緩み検知の自動化という工学的課題の解決に繋がる有用性を有するものと判断される。また、近年、摩擦帯電現象に基づく振動エネルギーハーベスタを筆頭に摩擦帯電デバイスが注目されているが、本提案はこれを粗面間の微小な相対運動検出に用いる新規なアイデアとも位置付けられ、学術的な有用性も高いものと評価できる。

本論文は、下記 3 編の査読付き論文および査読付き国際会議論文に基づいており、既に公表されている。また、3 編とも本申請者が筆頭著者である。

査読付き論文：

Chu Wang, Nanako Miura and Arata Masuda, Triboelectric Film Sensor for Integrity Monitoring of Bolted Joints, *Machines*, Vol. 11 (8), 826, pp.1-19, 2023. DOI:10.3390/machines11080826

Chu Wang, Nanako Miura, Motoaki Hiraga and Arata Masuda, Flexible printed circuit-based triboelectric film sensor for integrity monitoring of tensile bolted joints, *Engineering Research Express*, Vol. 6 (3), 035542, pp.1-14, 2024. DOI: 10.1088/2631-8695/ad6e58

査読付き国際会議論文：

Chu Wang, Nanako Miura, Motoaki Hiraga and Arata Masuda, Experimental Study on Applicability of Triboelectric Film Sensors for Integrity Monitoring of Shear Bolted Joints, *ASME 2024 Pressure Vessels & Piping Conference (PVP2024)*, No.122347, 2024. DOI: 10.1115/PVP2024-122347