

# 技術紹介

## 1

## 振動試験によるフィルム型コネクタの接続信頼性

### Electrical Reliability of a Film Type Connector by Vibration Test

佐藤 隼也	Junya Sato	商品開発センター 技術マネージャー
柴田 尚樹	Naoki Shibata	商品開発センター
松尾 幸祐	Kousuke Matsuo	商品開発センター 主任
三井 亮介	Ryosuke Mitsui	商品開発センター 主任 博士(学術)
吉良 敦史	Atsushi Kira	商品開発センター 技術シニアマネージャー 博士(工学)

キーワード: フィルム型コネクタ、粘弾性体、振動試験

Keywords: Film Type Connector, Elastic, Vibration Test

### 要 旨

あらゆるモノやシステムをつなげ、その情報を活用し、様々な仕組みを効率化しようとする取り組みが活発化しております。このような取り組みにおいては、これまで以上に多くのモノにセンサが組み込まれることが予想され、従来では想定されてこなかったモノや場所にもエレクトロニクスが実装されようとしております。このような潮流の中で、これまでとは異なる形態や機能を有するフレキシブルエレクトロニクスが注目されており、さまざまなデバイスの開発が精力的に進められています。これらのデバイスとの電気接続部においても可搬性、可撓性、薄さ、軽さが求められることが想定されます。本稿では、フレキシブルエレクトロニクスの機能を損なうことなく電気接続可能なフィルム型コネクタの振動試験による接続信頼性をご紹介します。

### SUMMARY

Efforts on improvement of the efficiency of various systems by connecting all kinds of objects and utilizing the acquired information have gradually been spread. In these efforts, electronics are being mounted on things and in places that were previously unpredicted. In this trend, flexible electronics, which are lightweight, thin, and can be used in various shapes, are attracting attention, and various devices are being developed. It is assumed that connectors that connect to these devices will also be required to be portable, flexible, thin, and lightweight. This paper introduces the connection reliability of film-type connectors through the vibration test, which enable electrical connection without compromising the functionality of flexible electronics.

## 1. 緒言

### 1.1 はじめに

あらゆるモノやシステムをつなげ、その情報を活用し、様々な仕組みを効率化しようとする取り組みが活発化しております。例えば、ドイツ工学アカデミーとドイツ連邦教育科学省が 2011 年に提唱した Industry 4.0 では、製造業における徹底的な自動化と情報のデジタル化により、サプライチェーンを含めたものづくりの最適化を目指しています。本取り組みにおいては、IoT (モノのインターネット) によりビッグデータを取得し、さらには AI (人工知能) により仮想空間で実空間を精確に再現すること (Digital Twins) で、これを達成しようとしております。<sup>1)</sup>したがって、これまで以上に多くのモノにセンサが組み込まれることが予想され、従来では想定されてこなかったモノや場所にもエレクトロニクスが実装されようとしております。

従来のエレクトロニクスは、半導体の小型化と集積化に追従することで、高機能化、高性能化と低コスト化の両立を図り、スマートフォンのような携帯化を先導してきました。一方、上記した潮流の中で、高集積化された電子回路や小型化されたセンサ (MEMS) を形状の自由度が高く、軽量化が見込まれるフィルムに実装した、これまでとは異なる形態や機能を有するフレキシブルエレクトロニクスが注目されており、センサ<sup>2,3)</sup>、RFID<sup>4)</sup>、電池<sup>5)</sup>など様々なデバイスの開発が精力的に進められています。さらにヘルスケア分野を志向したウェアラブルデバイス<sup>6)</sup>などの開発を通じた新たな価値創出に向けた取り組みが活発化しております。

これらのフレキシブルエレクトロニクスにおいては、電気接続部においても可撓性や可搬性、薄さ、軽さが要求されることが容易に想像され、さらには基材となるフィルムの耐熱性などの要求にこたえる必要があります。一般的にフレキシブル基板 (FPC) の電気接続には、FPC 用コネクタなどが利用されますが、コネクタによる電気接続ではフレキシブル性などが損なわれるおそれがあります。また、コネクタは、嵌合機構により発現する機械的な接触荷重を利用することで信頼性の高い電気接続を実現していますが、十分な接触荷重を確保するためには嵌合機構の小型化は限界があります。そこで、これらの課題を解決するため、著者らは、粘弾性体の形状復元力を利用したフィルム型コネクタの開発に取り組んできました。<sup>7-10)</sup>本コネクタは、フレキシブルエレクトロニクスの柔軟性を損なうことなく、その機能や意匠に調和する電気接続技術として、接続時に熱を必要とせず、接続部が薄く曲げることが可能な電気接続を実現しております。次項では本コネクタについて詳細に説明します。

### 1.2 フィルム型コネクタ

フィルム型コネクタは、接着性を有する弾性体上に電極が配置された構造が特長であり、接続時に生じる弾性体の形状復元力を起源とした接触荷重が電極上に生じます。図 1 にフィルム型コネクタを利用した電気接続方法の一例として、FPC との接続方法を示します。はじめに、フィルム型コネクタの電極と FPC の電極とを位置合わせし、加圧することで電極どうしが接触します。さらに加圧することで粘弾性体である粘着剤がフィルム型コネクタの配線間から押し出され、配線間の空隙を充填するように変形し FPC の基材であるポリイミドと接着します。フィルム型コネクタは接続時の荷重を除荷しても粘着剤が基板と接着することで接続された状態が保持され、電気的な接続が可能となります。フィルム型コネクタに使用する材料は、室温で貼り合わせるだけで電気接続可能な粘着剤以外にも、紫外線硬化型の接

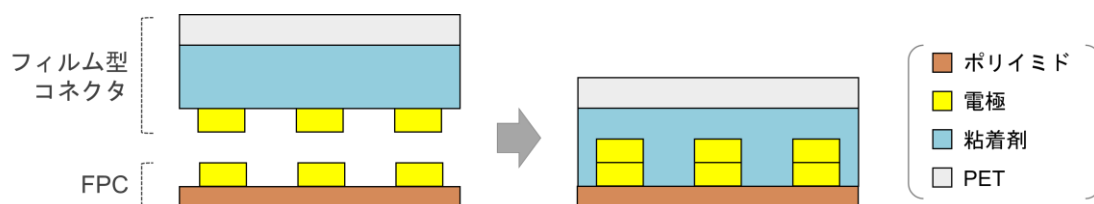


図1. フィルム型コネクタの接続プロセス

着剤など電気接続部に要求される特性に応じて材料の種類や接続プロセスを適宜変更することも可能となります。

フィルム型コネクタは、接続時に加えられる圧力により粘着剤が厚さ方向に変形します。変形した粘着剤が元の形状に復元しようとする反発力と凝集力により電極面どうしを押さえつける方向に接触荷重が発現します。粘着剤と基板との接着力が接触荷重を保持することで、フィルム型コネクタは電気接続を実現します。

一般的なコネクタは、金属や樹脂などの嵌合機構により発現する接触荷重を利用し、電極表面の接触面積を大きくすることで安定した電気接続を実現しています。一方、フィルム型コネクタは、粘弾性体の変形により発現する弾性力を利用し、相対する電極の表面形状に追従して電極を押さえつけることで接触面積を確保し、電気接続を実現しています。これまでに著者らは、フィルム型コネクタを用いた接続部は恒温恒湿試験、熱衝撃試験後も安定した電気接続であること、および①低背な接続構造、②粘弾性体の柔軟性、③基材との接着、④電極の間に樹脂が存在しにくい電極面の接触、である理由から、0.1 mm ピッチ（ライン/スペース = 40/60  $\mu\text{m}$ ）で曲率半径 2.5 mm まで曲げても安定した電気接続を維持できることを報告しています。<sup>7-8)</sup>本稿では、振動試験によるフィルム型コネクタの接続信頼性についてご紹介します。

## 2. 振動試験によるフィルム型コネクタの接続信頼性

形状の変化に対し柔軟に追従可能なフィルム型コネクタであれば曲げ動作だけでなく、振動の動きに対しても安定な電気接続を実現できると考え、FPC とフィルム型コネクタを接続したサンプルの振動試験を実施し、接続信頼性を評価しました。

### 2.1 評価用サンプル

本検討で使用した評価サンプルの構成を表1に示します。サンプルは、評価基板の電極とフィルム型コネクタの電極とを位置合わせし、圧着機エアアシスト VCM 加圧試験機 LPAV-Z-M-C1（アルファテックノ）を用いて 1.0 MPa の荷重を印加しながら高圧水銀灯を用いて 4000 mJ/cm<sup>2</sup> の紫外線を照射し、粘着剤を硬化させることでサンプルを作製しました（図2）。

表 1. 評価サンプルの構成 (厚さ)

	評価基板	フィルム型コネクタ
電極	Au/Ni/Cu (Au : > 0.03 $\mu\text{m}$ ) (Ni : 3–5 $\mu\text{m}$ ) (Cu : 18 $\mu\text{m}$ )	Au/Ni/Cu (Au : > 0.03 $\mu\text{m}$ ) (Ni : 3–5 $\mu\text{m}$ ) (Cu : 18 $\mu\text{m}$ )
基材	FR-4 (0.8 mm)	PI (25 $\mu\text{m}$ )
粘着剤		粘着剤 80 $\mu\text{m}$ PET 25 $\mu\text{m}$



図 2. フィルム型コネクタの接続プロセス

## 2.2 評価方法

### 2.2.1 接触抵抗値の測定方法

フィルム型コネクタと評価基板とを接続した際の接触抵抗の測定方法<sup>1)</sup>の例を図 3 に示します。ソースメータ 2450 型 (Keithley Instrymets) を図 3 に示すような四端子法を用いて評価基板と接続し、電流値を掃引した際の電圧値を測定しました。得られたデータをプロットし、近似曲線の傾きから接触抵抗値を算出しました。

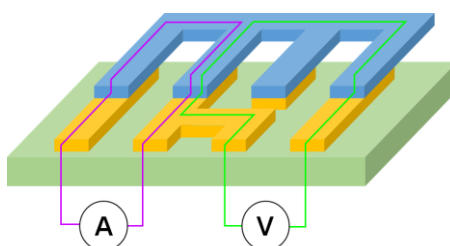


図 3. 四端子法による測定

### 2.2.2 振動試験方法

フィルム型コネクタと評価基板とを接続したサンプルの接続信頼性を振動試験により調査しました。電磁式加振装置 VTS100 (Vibration Test Systems) のサンプル台に評価サンプルを金属プレートで固定し (図 4a)、振動試験を実施しました。フィルム型コネクタの配線に対してピッチ方向を  $x$  方向、配線方向を  $y$  方向、鉛直方向を  $z$  方向としました (図 4b)。

振動試験の条件は、正弦波振動に耐える能力を決定するための標準的な試験手順について規定された JIS C 60068-2-6 に記載の事項に従い決定しました。<sup>12)</sup>この振動試験は①製品の機械的弱点及び／又は特定の機能の劣化を判定すること、②製品の機械的頑丈さを実証するため及び／又は製品の動的な挙動を調査することを目的とした試験となります。

加加速度  $50 \text{ m/s}^2$  において下限振動数  $11 \text{ Hz}$  から上限振動数  $500 \text{ Hz}$  の範囲で 10 サイクル掃引振動試験を実施しました。規格に記載されている下限振動数は  $10 \text{ Hz}$ 、振動数の許容差は  $\pm 1 \text{ Hz}$  であり、電磁式加振装置の下限設定値が  $11 \text{ Hz}$  であることから掃引周波数範囲を  $11 \text{ Hz}$  から  $500 \text{ Hz}$  とし振動試験を実施しました。抵抗値の変化は、振動試験を実施したサンプルの抵抗値から、振動試験を実施する前の抵抗値を差し引いて算出しました。表 2 に電磁式加振装置で設定した周波数、加加速度から速度と変位を算出した結果を示します。同じ加加速度で振動試験を実施しているため、周波数が低いほど振動速度、変位量が大きくなり、サンプルにかかる負荷が増大すると想定されます。

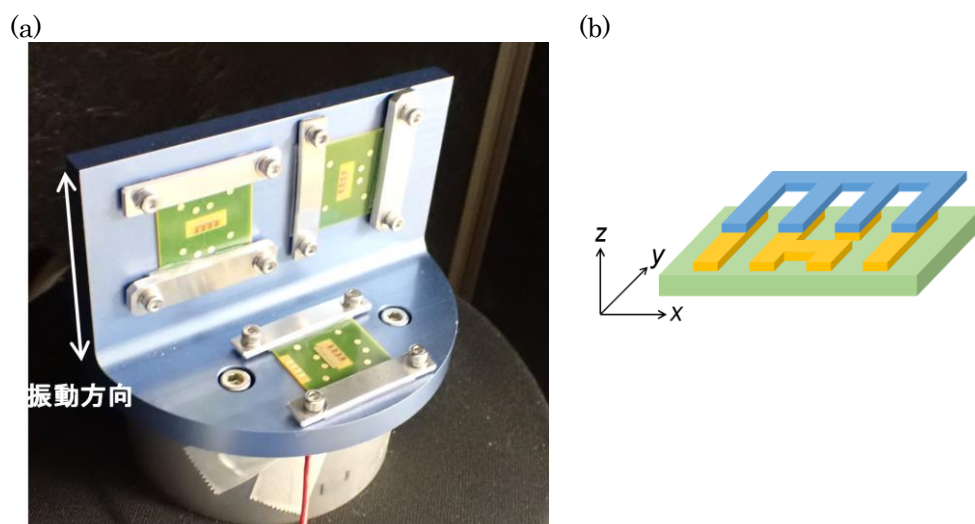


図 4. 振動試験方法例  
(a) サンプルの固定方法, (b) サンプルの軸方向

表 2. 電磁式加振装置の振動条件

設定周波数 (Hz)	設定加加速度 ( $\text{m/s}^2$ )	速度 ( $\text{m/s}$ )	変位 ( $\text{mm}$ )
11	50	0.723	10.467
12	50	0.663	8.795
100	50	0.080	0.127
300	50	0.027	0.014
500	50	0.016	0.005



### 2.2.3 振動測定方法

レーザードップラ振動計 LV-1800 (小野測器) を用いて、加速度  $50 \text{ m/s}^2$ 、周波数  $12 \text{ Hz}$ 、 $100 \text{ Hz}$ 、 $300 \text{ Hz}$ 、 $500 \text{ Hz}$  で評価サンプルを  $z$  方向に振動させながら速度パワースペクトル密度を測定しました。図 5 に測定方法の例を示します。測定箇所は評価基板の電極部 (図 5c) とフィルム型コネクタを接続したサンプルの電極部 (図 5d) としました。表 2 より、加速度  $50 \text{ m/s}^2$ 、周波数  $11 \text{ Hz}$  で振動させた際の変位は  $10.467 \text{ mm}$  となり、レーザードップラ振動計の測定レンジの  $10 \text{ mm}$  を超えるため、周波数  $12 \text{ Hz}$  で振動させたサンプルの評価を実施しました。

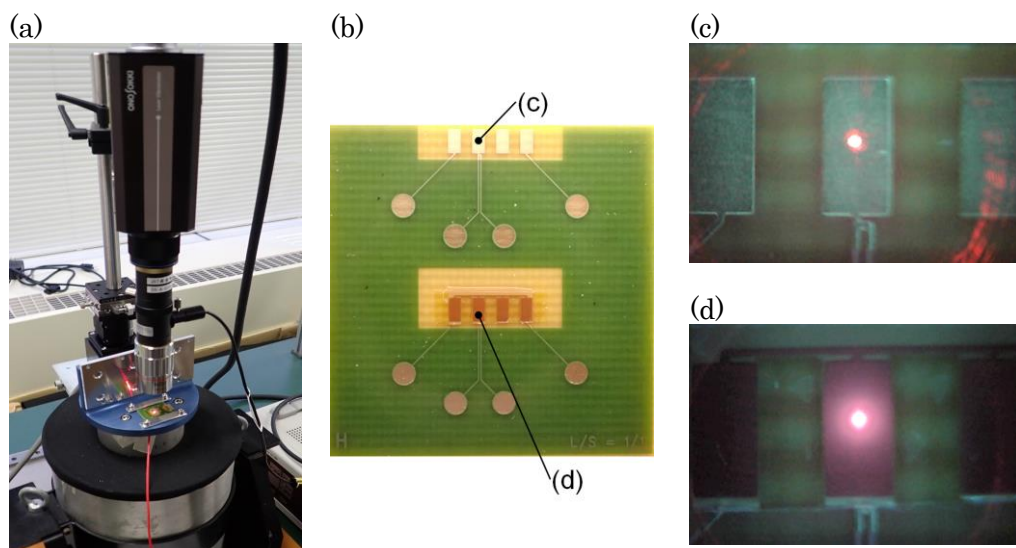


図 5. レーザードップラ振動計による振動測定

(a) 振動計外観, (b) サンプル外観, (c) 基板測定箇所, (d) フィルム型コネクタ測定箇所

## 2.3 結果と考察

配線幅  $1.0 \text{ mm}$  のフィルム型コネクタを評価基板と接続したサンプルの振動試験における接触抵抗値の変化を評価しました。図 6 (a) に  $x$  方向、図 6 (b) に  $y$  方向、図 6 (c) に  $z$  方向にサンプルを振動させる前と後の結果を示します。図 6 の結果を用いて近似曲線の傾きから振動試験前後の接触抵抗を算出した結果を表 3 に示します。いずれの振動方向においても接触抵抗値の変化は  $0.3 \text{ m}\Omega$  以下であり、振動に対して安定した電気接続であることが確認できました。

表 3. フィルム型コネクタの接触抵抗

振動方向	接触抵抗 ( $\text{m}\Omega$ )		
	試験前 (a)	試験後 (b)	差 (b-a)
$x$	11.96	12.09	0.13
$y$	11.11	11.11	0.00
$z$	10.85	11.11	0.26

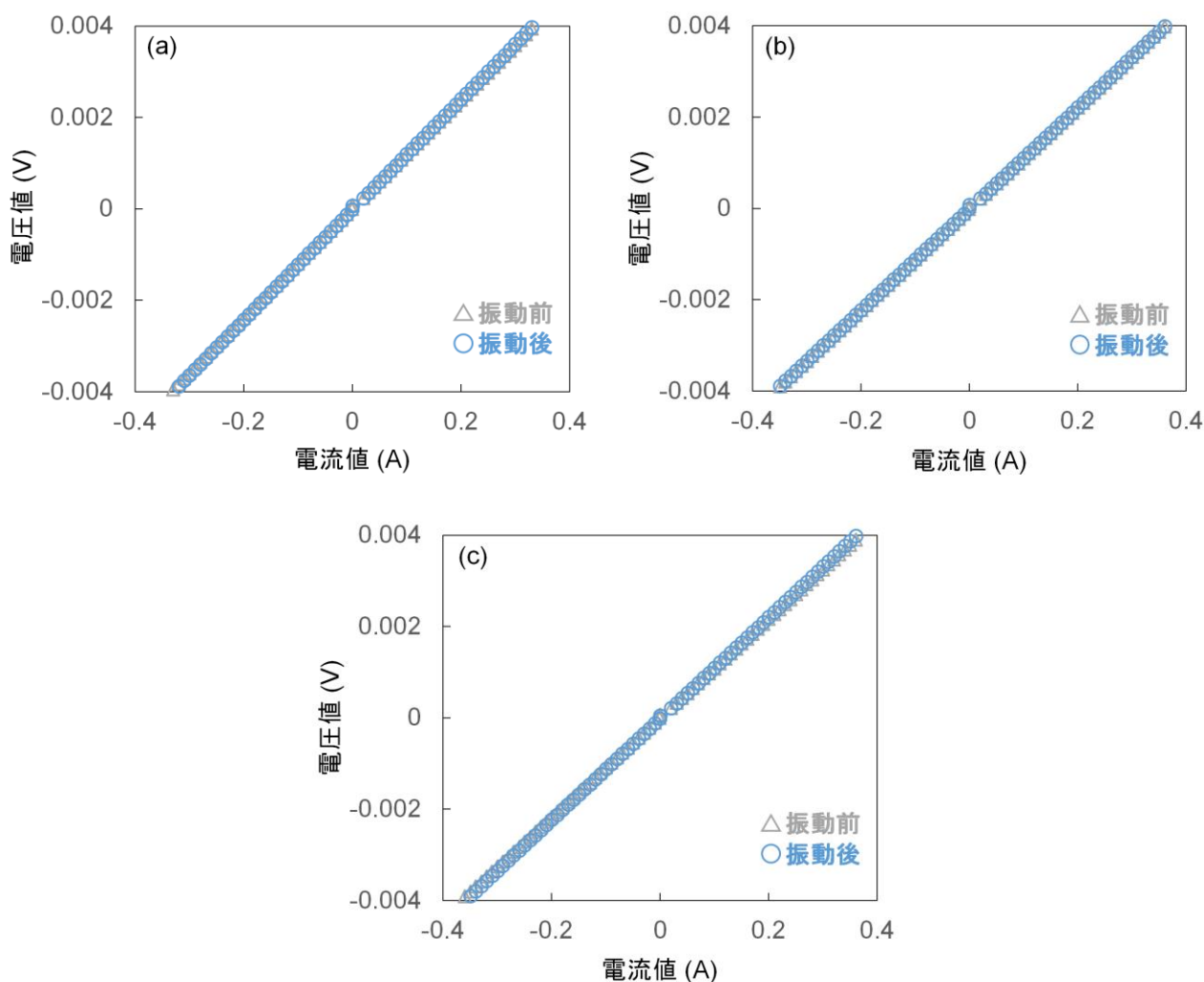


図 6. 振動試験前後の電気特性  
(a) x 軸振動, (b) y 軸振動, (c) z 軸振動

振動試験によるフィルム型コネクタの接続部の劣化を確認するために、振動試験をした後のサンプルを  $z$  方向に振動させながら速度パワースペクトル密度を評価しました。図 7 (a) に 12 Hz、図 7 (b) に 100 Hz、図 7 (c) に 300 Hz、図 7 (d) に 500 Hz で振動させた際の測定結果を示します。表 2 から加振装置の設定周波数が 12 Hz の際、0.663 m/s の速度が印加されていると考えられます。12 Hz で振動させた際のレーザードップラ振動計による測定結果から、基板、フィルム型コネクタの速度パワースペクトル密度が最大となるときの周波数は 12 Hz で、加振装置の設定値と同等であります。さらに、図 7 からスペクトル幅にも大きな変化はなく、加振装置の設定値と同等であることから、加振装置で設定した周波数、速度で振動していることが確認できました。100 Hz、300 Hz、500 Hz での振動においても同様に、周波数の測定値は設定値と同等であり、基板とフィルム型コネクタのスペクトル幅にも大きな変化はありませんでした。したがって、加振装置の振動に追従してフィルム型コネクタが変位していることが確認できました。

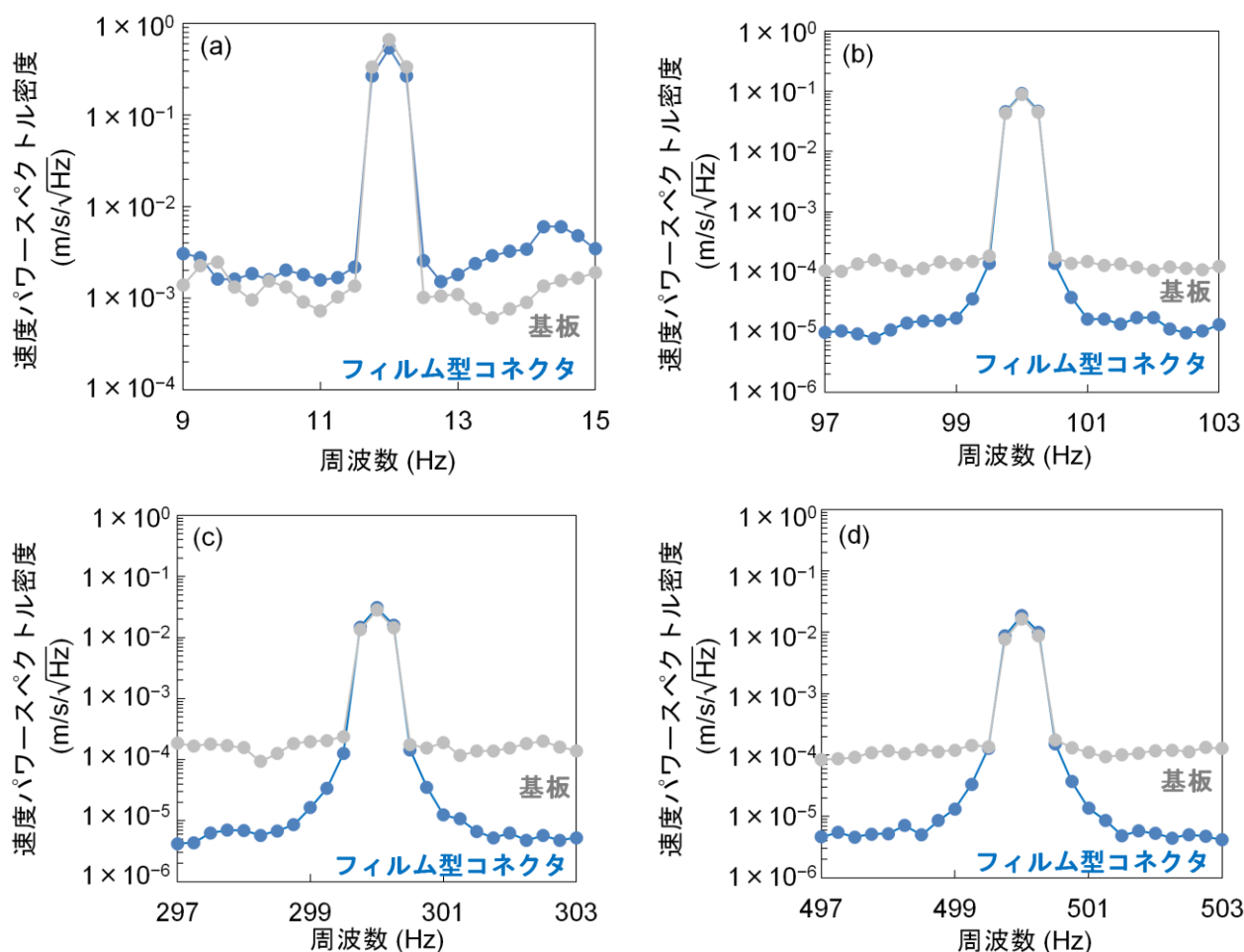


図 7. 各振動周波数での速度パワースペクトル密度測定結果  
(a) 12 Hz, (b) 100 Hz, (c) 300 Hz, (d) 500 Hz

抵抗測定結果および速度パワースペクトル密度測定結果から、フィルム型コネクタで接続したサンプルは、加速度  $50 \text{ m/s}^2$ 、11 Hz から 500 Hz の範囲での振動において、抵抗値変化量が  $0.3 \text{ m}\Omega$  以下の安定した電気接続を実現できることを確認しました。フィルム型コネクタで接続したサンプルは振動による負荷が印加されても、基板の振動に追従して変位することで接続信頼性の高い電気接続を実現していると考えられます。

### 3. まとめ

本稿では、フィルム型コネクタの劣化を振動試験により確認しました。フィルム型コネクタを JIS C 60068-2-6 に従い、加速度  $50 \text{ m/s}^2$  において 11 Hz から 500 Hz の掃引を 10 回繰り返す振動試験を実施した結果、試験前後で接触抵抗に大きな変化はなく、構造として機械的に安定であることを明らかにしました。また、ドップラー振動計から、上記条件でフィルム型コネクタが基板の振動に追従して振動していることを見出し、フィルム型コネクタの接着力が汎用地上設置搬送機械、汎用陸上輸送車両、小型



高速船及び一般航空機用の部品に適用できる振動試験の条件を満たすことが分かりました。フィルム型コネクタの柔軟性や動きに対する安定性などの付加価値がエレクトロニクスの適用シーンを拡張することで、モノのインターネット化を推進するためのセンサネットワーク構築に貢献する電気接続技術のひとつとして期待できます。

## 【参考文献】

- 1) A. Padovano, F. Longo, L. Nicoletti, and G. Mirabelli, IFAC PapersOnLine **51**, 631 (2018).
- 2) S. Lee, S. Franklin, F. A. Hassani, T. Yokota, M. Nayeem, Y. Wang, R. Leib, G. Cheng, D. W. Franklin, and T. Someya, Science **370**, 966 (2020).
- 3) D. Maddipatla, B. B. Narakathu, and M. Atashbar, Biosensors **10**, 199 (2020).
- 4) Y. Wang, C. Yan, S. Y. Cheng, Z. Q. Xu, X. Sun, Y. H. Xu, J. J. Chen, Z. Jiang, K. Liang, and Z. S. Feng, Adv. Funct. Mater. **29**, 1902579 (2019).
- 5) G. Lee, M. Kim, Y. W. Choi, N. Ahn, J. Jang, S. M. Kim, J. G. Lee, D. Kang, H.S.Jung, and M. Choi Energy Environ. Sci. **12**, 3182 (2019).
- 6) K. Kim, B. Kim, and C. H. Lee, Adv. Mater. **32**, 1902051 (2020).
- 7) R. Mitsui, S. Takahashi, S. Nakajima, K. Nomura, and H. Ushijima, Jpn. J. Appl. Phys. **53**, 05HB04 (2014).
- 8) R. Mitsui, J. Sato, S. Takahashi, and S. Nakajima, Electronics **4**, 827 (2015).
- 9) 三井亮介, 佐藤隼也, 中島伸一郎, 航空電子技報 **39**, 1 (2017).
- 10) 三井亮介, 後藤理恵, 佐藤隼也, 吉良敦史, 中島伸一郎, 航空電子技報 **41**, 1 (2019).
- 11) K. W. Jang, and K. W. Paik, IEEE Trans. Compon. Packag. Technol. **32**, 339 (2009).
- 12) 日本工業標準調査会, 環境試験方法—電気・電子—第2-6部: 正弦波振動試験方法 (日本規格協会, 東京, 2010), p. 5