

電気機器の長期信頼性を効率的に確保する ケーブル配線設計技術

Cable Wiring Design Technology to Efficiently Ensure Long-Term Reliability of Electrical Equipment

長谷部 佳文 HASEBE Yoshifumi 森本 淳 MORIMOTO Jun

電気機器において、電気信号や電力などを伝達するキー部品であるケーブルは、製品の可動部に配線した場合、繰り返しの屈曲によって断線するおそれがある。しかし、使用期間内に断線しないことを試作品の評価試験で確認するには、長い試験時間が必要となる。製品開発の生産性を向上するには、設計段階で、断線しにくいケーブルを選定し、適切な経路で配線することが求められる。

東芝テック(株)は、これに対して、製品に搭載されたケーブルが断線するまでの屈曲回数を予測する技術を開発した。ケーブルの屈曲動作が停止している時間を考慮した数値解析手法を適用することにより、実使用における破断までの屈曲回数の予測が可能となった。この技術を実際の製品開発に適用し、屈曲耐久性を大幅に向上できる見込みが得られた。

Cables installed in an electrical product play a key role in the transmission of electrical signals and electricity between product constituent components. If a cable connected to moving mechanical parts of the component deteriorates due to repeated bending, it could result in cable disconnection. Because long-term testing is required, it is difficult to confirm whether disconnection occurs during the operating lifetime via prototype testing, so selection of both durable wire material and appropriate cable routing at the cable design phase is essential to improve product development efficiency.

With this in mind, Toshiba Tec Corporation has developed technology capable of predicting the number of bending cycles leading to fracture and/or disconnection of cables in products through the application of a numerical analysis method that takes into consideration cable bending operation stopping time. This technology has been applied to actual product development and is significantly contributing to improving bending durability.

1. まえがき

東芝テック(株)では、製品開発の生産性を向上させる取り組みとして、開発上流での設計品質の作り込みに力を入れている。そのため、設計においては、まず、(1)1DCAE (1 Dimensional Computer Aided Engineering)を活用した機能検証を行って製品の仕様を作り込み、次に、(2)その仕様に基づいて3次元(3D)CADで部品形状の作成及び部品配置を行った3Dモデルを構築し、そして、(3)その3Dモデルに対して、様々な数値解析技術⁽¹⁾を用いた構造・機能の検証を行っている。

最終的に、製品の試作品を対象とした評価試験を行って製品の品質を確認しているが、製品を長期間使用しても破損などの問題が生じないことを確認するためには、長期間の評価試験を行う必要がある。特に、電気機器のキー部品であるケーブルを製品の可動部に配線する場合、屈曲耐久性、すなわち、ユーザーが使用中に屈曲と伸展を繰り返しても断線しないことが求められる。このため、試作品の可動部を繰り返し動作させて、ケーブルが断線するまでの屈曲耐久性を評価しているが、数か月の期間を要する。評価が不合格になると、再設計と再評価が必要となり、開発工

数を増大させることになる。このような背景から、ケーブルの屈曲耐久性を設計段階で予測する技術が開発され、実用化^{(2),(3)}されている。これらは主に、モーターなどの動力によって、一定時間、屈曲が連続して繰り返される現象を想定している。

一方、実使用においては、ユーザーが手で製品の可動部を動作させる場合、ケーブルの屈曲と伸展の繰り返しは連続せず、屈曲した状態、あるいは伸展した状態で一定時間、停止するケースが多い。このような間欠動作の場合には、連続動作の場合に比べて、少ない屈曲回数で断線することが経験的に知られている⁽⁴⁾。しかしながら、間欠動作において、動作が停止している時間間隔(以下、間欠時間と呼ぶ)を考慮して屈曲耐久性を予測する手法は、ほとんど公表されていない。

そこで当社は、まず、間欠時間によって屈曲耐久性が低下するメカニズムを推定し、ケーブル単体を対象とした評価試験によって、その妥当性を検証した。更に、製品を対象とした数値解析の結果を、推定メカニズムに基づいて分析することにより、実使用を想定した屈曲耐久性の予測を可能にし、製品の配線設計に適用した。ここでは、開発したこの技術の概要について述べる。

2. 対象とした製品

この取り組みの対象とした製品のマルチターミナルMP-10を、図1に示す。製品本体のカードリーダー内部に、カード情報を読み書きするための磁気ヘッドが搭載されている。磁気ヘッドには、FPC (Flexible Printed Circuits) と呼ばれるケーブルが接続されている。カードリーダーにカードを通すと、磁気ヘッドがカードによって押し込まれることにより、FPCに屈曲が発生する。カードを通し、次にカードを通すまでの時間が間欠時間となる。MP-10では、図中に示す屈曲部(曲率半径2.5 mm)の断線が懸念される。

3. 間欠時間によって屈曲耐久性が低下するメカニズム

3.1 メカニズムの推定

対象としたMP-10のFPCは、銅を導体材料として使用している。高分子材料と同様に、銅においても応力緩和が発生する。この応力緩和現象に着目し、FPCに発生する応力を、図2(a)に示すMaxwellモデルで表現した。ばね部分が銅の弾性、ダッシュポットが応力緩和を発生する粘性に相当する。図2(b)に示すとおり、初期応力 σ_0 は、間欠時間 t の間に σ_t に減少する。

カードを通す動作により、磁気ヘッドが押し込まれてから元の位置に戻るまでの、FPCに発生する応力のサイクルを図3に示す。動作を繰り返すことで、間欠時間の有無にかかわらず、最終的には、応力のサイクルは図中の太線のようなになる。間欠時間がある場合(図3(b))の応力振幅 σ_{A0}' は、応力緩和 σ_t が発生することにより、間欠時間がない場合(図3(a))の応力振幅 σ_{A0} よりも大きくなる。

FPCの屈曲耐久性は、FPCを繰り返し屈曲させて断線したときの回数(以下、破断繰返し数と呼ぶ)にて評価する。FPCの応力振幅(S)と破断繰返し数(N)の関係、すなわち S - N 線図を図4に示す。応力振幅が増加すると、破断

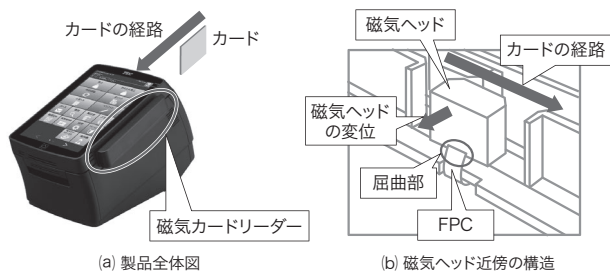


図1. マルチターミナルMP-10

カードを磁気カードリーダーに通すと、磁気ヘッドに変位が発生し、これに伴い、磁気ヘッドに固定されたFPCに曲げ変形が発生する。

MP-10 multi-terminal

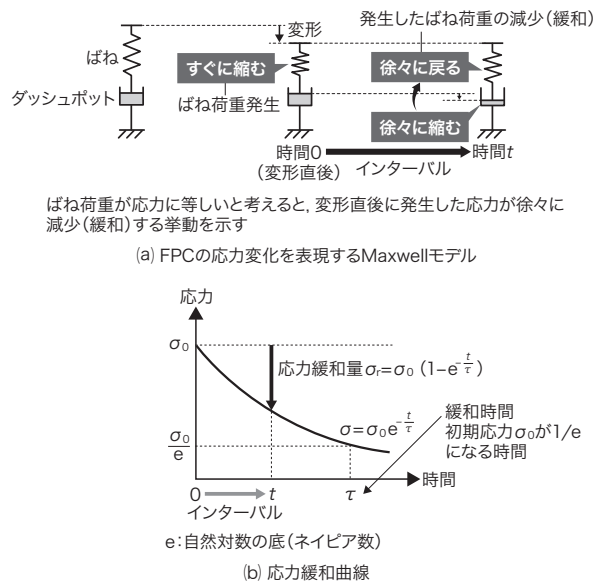


図2. FPCの応力変化を表現するMaxwellモデルと応力緩和曲線

FPCの粘弾性特性に着目し、FPCに発生する応力緩和現象をMaxwellモデルで表現した。

Maxwell model for stress relaxation in flexible printed circuit (FPC) and stress relaxation curve

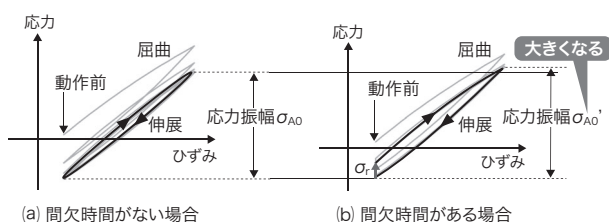


図3. 間欠時間の有無による応力のサイクルの違い

屈曲／伸展のサイクルを繰り返したときの応力振幅は、応力緩和の影響により、間欠時間がない場合に比べて、ある場合の方が大きくなる。

Relationship between stress and strain with and without time interval during stress cycles of FPCs

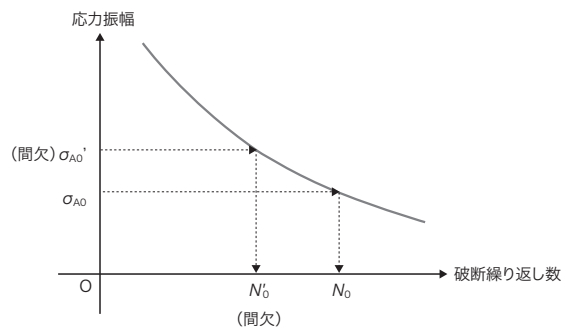


図4. 間欠時間が破断繰返し数に及ぼす影響

間欠時間がある場合の方が、応力振幅が大きくなることから、破断繰返し数は小さくなる。

Effect of time interval on number of bending cycles to fracture

繰返し数は単調に減少する。したがって、応力振幅が σ_{A0} から σ_{A0}' に増加すると、破断繰返し数が N_0 から N_0' に低下する。

以上のように、FPCに発生する応力をMaxwellモデルで表現することにより、間欠時間によって屈曲耐久性が低下するメカニズムを推定した。

3.2 メカニズムの検証

3.1節で推定したメカニズムを検証するため、図5に示すFPCの試験片を用いて各種評価を行った。

まず、 $S-N$ 線図の作成、及び4章の数値解析に必要なFPCのヤング率、及びFPCの応力緩和量を測定した。図6(a)に示す試験セットを用い、ポンチの押し込み量と荷重を測定(図6(b))して、ヤング率5,835 MPaを算出した。その後、ポンチを押し込んだ状態で保持したときの荷重の時刻歴(図6(c))を測定し、初期応力から一定時間で緩和する割合を応力緩和率として算出した。MP-10におけるFPCの屈曲半径と間欠時間を想定して、ポンチの曲率半径を2.5 mmとし、ポンチを押し込んだ4秒後の応力緩和率を算出すると23 %であった。

次に、FPCの屈曲耐久性を評価するため、図7(a)に示す屈曲試験機を使用した。半径 r のマンドレルを固定した回転盤が $\pm 90^\circ$ の範囲で往復回転することにより、FPCに曲率半径 r の曲げひずみを繰返し発生させた。回転盤の動作を制御することにより、間欠時間のない場合(図7(b))とある場合(図7(c))の2種類の評価を行った。なお、後者については、対象製品であるMP-10を想定して、間欠時間4秒

かつマンドレルの半径が2.5 mmの場合についてだけ実施した。取得した $S-N$ 線図を図8に示す。

3.1節に示したメカニズムによれば、間欠時間がある場合、応力緩和率に基づく、応力振幅は1.23倍となる。間欠時間がない場合の $S-N$ 線図において、この応力振幅のときの破断繰返し数(メカニズムに基づく予測値)を求め、間欠時間がある場合の破断繰返し数(実測値)と比較した。

図9に示すように、予測値と実測値は良好に一致しており、メカニズムの妥当性が検証できた。

4. 製品の配線設計への適用

検証したメカニズムを適用し、FPCの配線経路の検討を

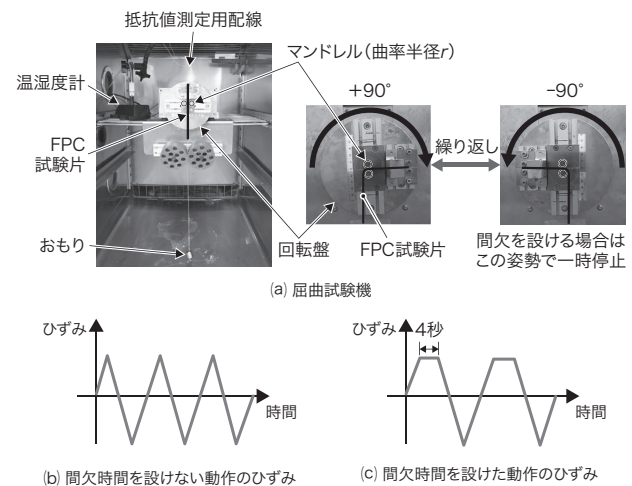


図7. 屈曲疲労試験の概要

FPCの屈曲耐久性データ取得のため、間欠時間を設けない動作と間欠時間を設けた動作での屈曲疲労試験を実施した。

Outline of bending fatigue tests

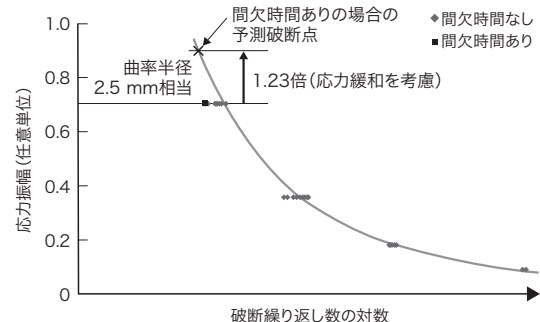


図8. 測定で得られた $S-N$ 線図

屈曲疲労試験によりFPCの破断繰返し数を測定して作成した $S-N$ 線図を用い、応力緩和を考慮して算出した応力振幅から間欠時間がある場合の破断繰返し数を予測した。

Stress amplitude-number of cycles to failure ($S-N$) curve



図5. 評価用のFPC試験片

ポリイミドと銅箔の積層構造であるFPC試験片を評価に用いた。

FPC specimen

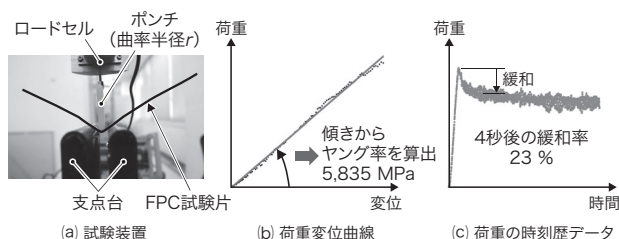


図6. 3点曲げ試験の装置及び測定結果

ヤング率及び応力緩和量を測定するために、3点曲げ試験を実施した。

Results obtained by three-point bending tests

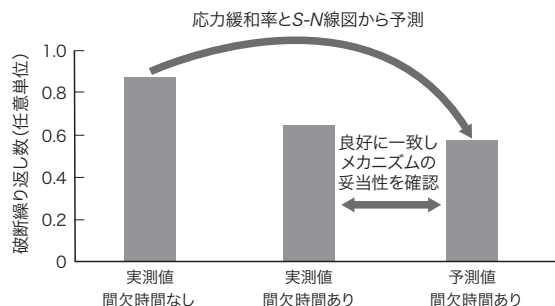


図9. 屈曲試験で得られた破断繰り返し数の実測値と算出した予測値の比較

推定したメカニズムに基づいて算出した間欠時間がある場合の動作での破断繰り返し数の予測値は実測値に近い値となった。

Comparison of predicted and measured number of bending cycles to fracture

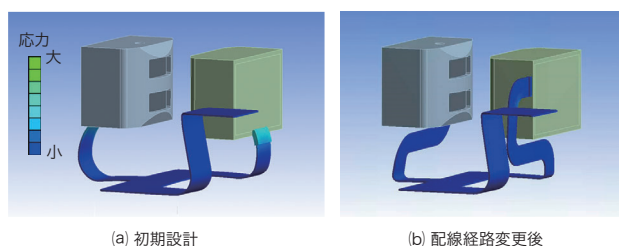


図10. MP-10の配線経路変更前後におけるFPCの応力解析結果の比較

配線経路の変更前後における応力振幅を算出するため、応力解析を実施した。

Comparison of FPC routes before and after FPC stress analyses

行った。初期設計の場合と、断線が懸念される屈曲部の配線を変更した場合の屈曲耐久性を比較した。カードを通す動作によって磁気ヘッドが押し込まれる方向（カードの厚み方向）に変位を与え、間欠時間を考慮しない場合のFPCに発生する応力の振幅を、非線形有限要素解析ツールAnsysを用いて算出した。

初期設計の場合の応力解析の結果を図10(a)、配線を変更した場合の応力解析の結果を図10(b)に示す。

得られた応力は応力振幅とみなせることから、3章で取得した応力緩和率より、間欠時間を考慮した応力振幅を算出した。そして、図11(a)に示すように、3章で取得したS-N線図を参照することにより、間欠時間を考慮した破断繰り返し数を予測した。

初期設計と配線変更後の破断繰り返し数（予測値）の比較を図11(b)に示す。配線を変更することにより、初期設計に対して屈曲耐久性を104倍向上できる見込みが得られ、変更後の配線経路がMP-10に採用された。

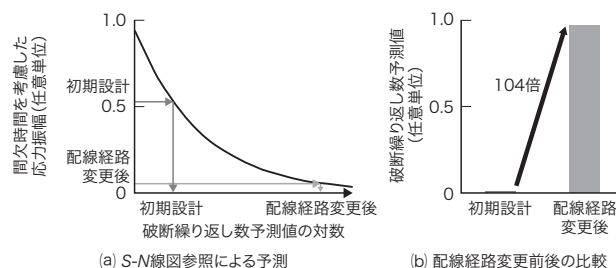


図11. MP-10の配線経路変更前後におけるFPCの破断繰り返し数予測の比較

応力解析及び3点曲げ試験で得た緩和率から応力振幅を求め、屈曲疲労試験で得たS-N線図からFPCの破断繰り返し数を予測し、配線経路変更の効果を確認した。

Comparison of predicted number of bending cycles to fracture before and after FPC route change

5. あとがき

間欠時間を考慮したケーブルの破断繰り返し数を予測する設計手法を開発し、製品への適用を開始した。この取り組みにより、これまで困難であった設計段階での屈曲耐久性予測が可能となったことで、長期間の評価試験で不合格になった際に生じていた後戻りを抑制でき、大幅な開発効率の向上につながった。

この技術を当社のほかの製品開発にも適用することにより、今後も、信頼性の高い製品の開発とタイムリーな上市を継続する。

文 献

- (1) 長谷部佳文, 森本 淳. 数値解析技術の活用による設計品質の確保. 東芝レビュー. 2020, **75**, 1, p.18-21. <https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2020/01/75_01pdf/a06.pdf>, (参照 2024-01-09).
- (2) 森本 淳, ほか. “ケーブルを対象とした疲労寿命解析技術の開発と製品への適用”. 計算力学講演会論文集29巻, 愛知, 2016-09, 日本機械学会, 2016, p.81-83.
- (3) 中村智一, ほか. CAE技術を用いた自動車用ワイヤーハーネスの屈曲耐久性評価手法の開発. 三菱電線工業時報, 2010, **107**, p.21-25.
- (4) JX日鉱日石金属, 中室嘉一郎, 庄延銅箔, 銅張積層板, フレキシブルプリント配線板及びその製造方法, 特許第5826160号, 2015-12-02.



長谷部 佳文 HASEBE Yoshifumi
東芝テック (株)
技術戦略部 グローバルモノ創りセンター
品質工学会会員
Toshiba Tec Corp.



森本 淳 MORIMOTO Jun
東芝テック (株)
技術戦略部 グローバルモノ創りセンター
Toshiba Tec Corp.