



車載多芯複合ケーブルの屈曲負荷解析

Bending Load Analysis of In-vehicle Multi-core Composite Cables

松村 友多佳*
Yutaka Matsumura

藤田 太郎
Taro Fujita

山内 雅晃
Masaaki Yamauchi

大嶋 拓実
Takumi Ooshima

八木澤 丈
Jo Yagisawa

越智 祐司
Yuuji Ochi

自動車の足廻りに配策される多芯複合ケーブルの曲げ形状、屈曲負荷を精度良く算定する解析技術を開発した。多芯複合ケーブルは、複数本の電線（コア線）を束ねて一体化したもので、ホイール内に配置される電動パーキングブレーキ、車輪速センサー等と車体側の電子制御ユニットを繋ぎ、給電と信号伝送を担う。自動車の電動化、先進運転支援システム（ADAS）の技術開発が進展し、需要が拡大している。ケーブルの訴求点は、走行時にホイールの上下動に伴う繰り返し屈曲を受けても導体が断線しない耐屈曲性である。従来、CADで実車配策形状を決め、ケーブル設計を行っていたが、屈曲負荷の算定精度が低く、ケーブル設計決めのために試作／評価での合わせ込みが必要で、開発期間が長引く原因となっていた。今回開発した解析技術により、ケーブル両端を所定の位置・角度で固定した際の曲げ形状、屈曲負荷を精度良く算定でき、開発を効率化できた。

We have developed a new analysis technology to accurately calculate the bending shape and bending load of multi-core composite cables installed in the undercarriage of automobiles. The multi-core composite cables are made by bundling multiple electric wires (core lines) and integrating them. They connect the electric parking brake, wheel speed sensor, etc. arranged in the wheel to the vehicle body-side unit, and are responsible for power supply and signal transmission. Demand for the cables is increasing with the electrification of automobiles and technical development of advanced driver-assistance systems (ADAS). The appealing point of the cable is the bending resistance, which prevents the conductor from breaking even when it is repeatedly bent due to the vertical movement of the wheel during traveling. In the past, the cable design was performed after determining the actual vehicle layout shape using CAD, but the calculation accuracy of the bending load was low, and the cable design had to be adjusted during prototyping and evaluation, causing the development period to be prolonged. With the newly developed analysis technology, the bending shape and bending load can be accurately calculated when both ends of the cable are fixed at a predetermined position and angle, thereby streamlining development.

キーワード：電動化、先進運転支援システム（ADAS）、電動パーキングブレーキ（EPB）、CAD、CAE

1. 緒言

自動車の電動化、先進運転支援システム（ADAS）の技術開発が進展し、ホイール内に電動パーキングブレーキ（Electric Parking Brake = EPB）、車輪速センサー（Wheel Speed Sensor = WSS）等の電動部品、センサーの装着例が増えており、車体側の電子制御ユニット（ECU）と繋ぐ多芯複合ケーブルの需要が拡大している。多芯複合ケーブルは、各部品・センサーに給電及び信号伝送を担う複数本の電線（コア線）を束ねて一体化したものである（図1）。

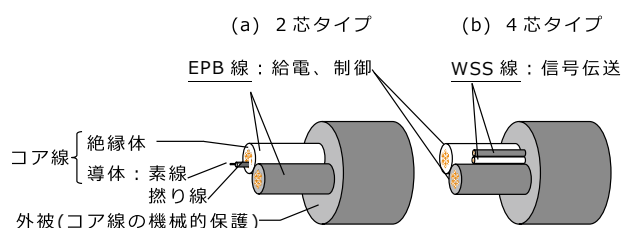
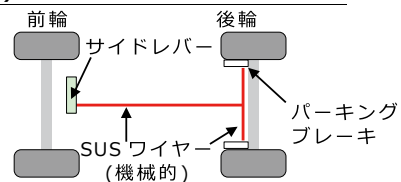


図1 EPBケーブルの構造例

EPBは、従来、運転席のサイドレバーと機械的に繋いで操作していたパーキングブレーキを電気的な接続に変更したものである（図2）。EPBには、渋滞対応型アダプティブクルーズコントロール（ACC）システムの一部として前方

(a) 機械式パーキングブレーキシステム



(b) 電動パーキングブレーキ（EPB）システム

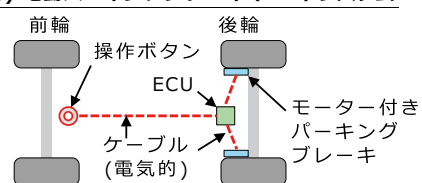


図2 パーキングブレーキ方式の違い

車両に合わせて停車を保持できる、パーキングブレーキの解除忘れを防止できる、サイドレバーを操作ボタンに変更し運転席周りを省スペース化できる等のメリットあり、普及が進んでいる。

多芯複合ケーブルは、車体側 ECU とホイール内の EPB ユニートを繋ぐため、ホイールの上下動に伴い、繰り返し屈曲動作を受ける (図3)。そのため、多芯複合ケーブルの訴求点は高い耐屈曲性であり、繰り返し屈曲を受けるが導体が断線しないことが重要である。導体断線に至る屈曲回数 (屈曲寿命) が大きいほど耐屈曲性が高いと言える。

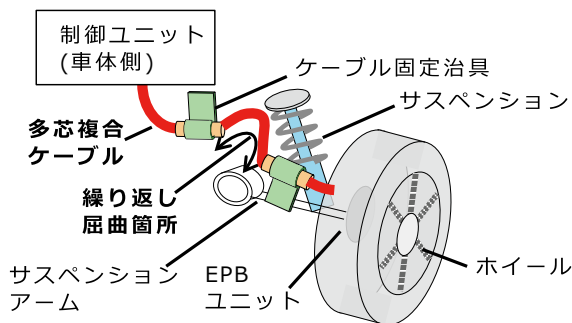


図3 EPBケーブルの配策方法

同じケーブルでも実車配策形状 (ケーブルの固定部間の長さ、固定角度等) が異なると屈曲負荷の大きさが変化し、屈曲寿命も変わる。屈曲負荷は、ホイールの上下動のストローク (サスペンションが伸びきった状態 (=フルバウンド) ~縮みきった状態 (=フルリバウンド)) における導体素線の歪み変化量 (導体歪み量) で表される (図4)。

導体歪み量にはケーブルの曲げ変形に由来する成分とねじり変形に由来する成分がある。それぞれ、ケーブルのフルバウンド状態及びフルリバウンド状態の曲率半径 (R_b 、

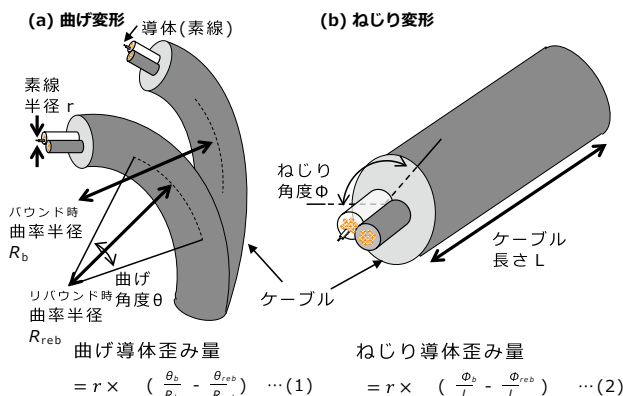


図4 屈曲負荷の算定方法⁽¹⁾

R_{reb})、曲げ角度 (θ_b 、 θ_{reb})、ねじり角度 (Φ_b 、 Φ_{reb}) を用い、図4中の式 (1)、(2) で計算できる。

2. 開発課題

従来、ケーブルの実車配策形状は CAD (Computer Aided Design) により作図していた。CAD ではケーブルの物性を考慮した作図ができないため、ケーブルの曲がり方が現実とは異なり、屈曲負荷を精度良く算定できない問題があった。そのため、ケーブル設計、実車配策形状の良し悪しは、工数を掛けて実車配策形状を再現した屈曲試験を行って見極めていた。しかし、屈曲試験が不合格となってケーブル設計あるいは実車配策形状の見直しが必要になるケースも多く、開発期間が長引く原因となっていた。

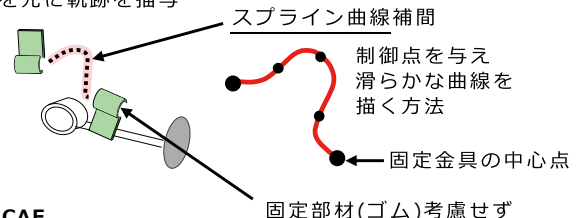
今回、CAD 設計データを元に CAE (Computer Aided Engineering) による解析を行い、屈曲負荷を精度よく算定する技術の開発に取り組んだ。ケーブル設計及び実車配策形状の試作/評価での合わせ込み回数を減らし、屈曲信頼性が担保された EPB ケーブルを効率的に開発することを目指した。

まず、CAD と CAE の違い、CAE のメリットを説明する。

CAD はコンピュータによる設計支援ツールである (図5 (a))。ケーブル、固定部材 (ゴム素材であることが多い) を含めた周辺部品を仮想空間内で配置し、部品間の干渉や取り回しを確認するための作図を目的とする。ケーブルの曲がり方は、固定部間のケーブル長、固定角度、ケーブル・固定部材の構成材料の機械物性、ケーブル/固定部材間の

(a) CAD

- ・目的 = 作図、設計支援
- ・ケーブルを含めた各部品を配置
- ・ケーブルの軌跡はスプライン曲線補間で記述 (=物性を反映していない)
- ・固定部材 (ゴム) を考慮せず、固定金具の中心点を元に軌跡を描写



(b) CAE

- ・目的 = 応力・歪みの解析、シミュレーション
- ・記述対象をケーブル、固定部材などに限定
- ・ケーブルを有限の要素に分割し、各要素の変形を計算することでシミュレーションが可能
- ・ケーブルと固定部材 (ゴム) 間の接触も考慮可能

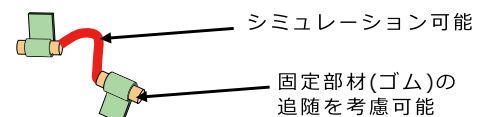


図5 CAD と CAE の違い

摩擦力によりケーブル内部に働く応力・歪みによって定まるが、CADでは、固定部材の中心点間のスプライン曲線補間^{*1}によってケーブルの曲がり方を作図している。屈曲負荷はケーブルの曲がり方によって決まるため、CADで求まる屈曲負荷の算定精度は低い。市販のCADソフトウェアの一部では、応力・歪み解析できるオプションもあるが、ケーブルの様な柔軟な対象物の大変形での解析は困難である。

一方、CAEは設計データに対する応力・歪み解析を目的とするツールである(図5(b))。記述対象をケーブル、固定部材に限定し、これを有限の要素に分割して各要素の運動方程式を計算する。ケーブルの曲げ/ねじり変形、固定部材との摩擦力も考慮しており、現実に近いケーブルの曲がり方を求めることができ、屈曲負荷を精度良く算定できる。

3. CAE解析技術の検討

次にCAE解析モデルの考え方、CAE解析の進め方を説明する。

現実のケーブルは図1のように、複数のコア線を撚り合わせ、機械的保護を担う外被材を被覆した構造である。しかし、詳細構造は考慮せず、ケーブルを一次元の一様な紐(CAE解析で言う梁要素)としてモデル化し、パラメータには実測物性を用いて現実と合わせ込むことで、必要な曲げ変形、ねじり変形を計算可能となり、屈曲負荷を十分な精度をもって効率よく算定できると考えた。

固定部材は三次元的な変形を解析する必要があり、CAE解析で言うソリッド要素として扱った。

解析に当たって、梁要素とみなすケーブルの長手方向(局所座標系、3軸)とその法線方向(1軸、2軸)を規定した局所座標系を定義した。1軸、2軸方向の曲げ変形、3軸方向のねじり変形の変形量を計算し、ケーブルの導体歪み量を図4及び図6中の式(1)、(3)で算定できる。

CAE解析に必要なケーブル、固定部材の実測物性は、曲げ弾性率、ポアソン比、比重である。特に曲げ弾性率の影響が大きい。

以上のようにして、CAE解析モデルを構築し、CAE解析を進めることとした。以下、モデルケースでの屈曲動作解析と妥当性検証について説明する。

前述の様に、CADでサスペンションのフルバウンド/フルリバウンドの固定部材位置を作図し、ケーブル(梁要素)と固定部材(ソリッド要素)をモデル化し、サスペンション動作に伴うケーブルの屈曲動作による導体歪み量をCAE解析により算定した。

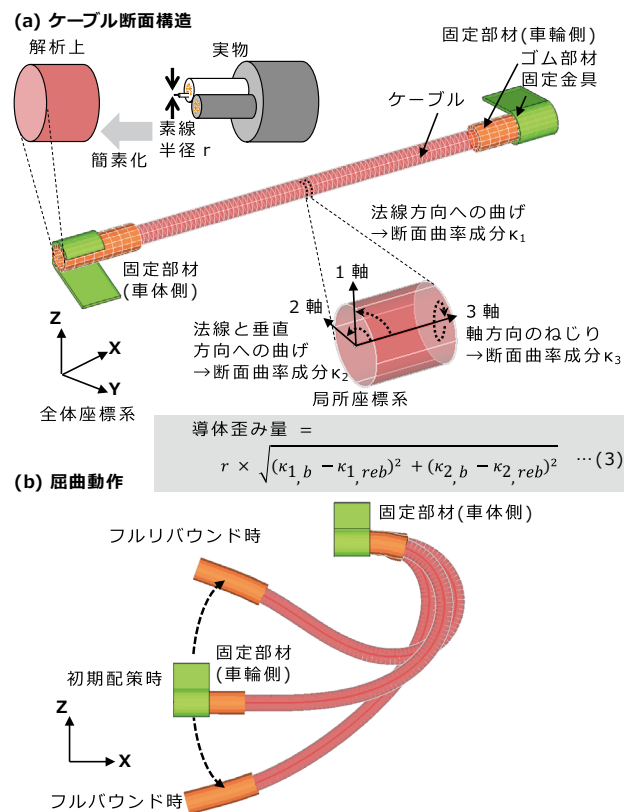


図6 解析対象、動作のモデル化

4. 解析精度の検証

解析の妥当性を次に述べる2通りの方法で検証した。

一つ目の検証方法は、モデルケーブルの両端を固定して屈曲動作をさせた場合に、両端間の形状を3Dスキャナで測定し、CAEで算定した屈曲動作による曲げ形状との一致を確認する方法である。結果、CAEにより忠実に現実のケーブルの曲げ形状を再現すると確認できた(図7)。

二つ目の検証方法では、まず、①ケーブルを所定の曲率

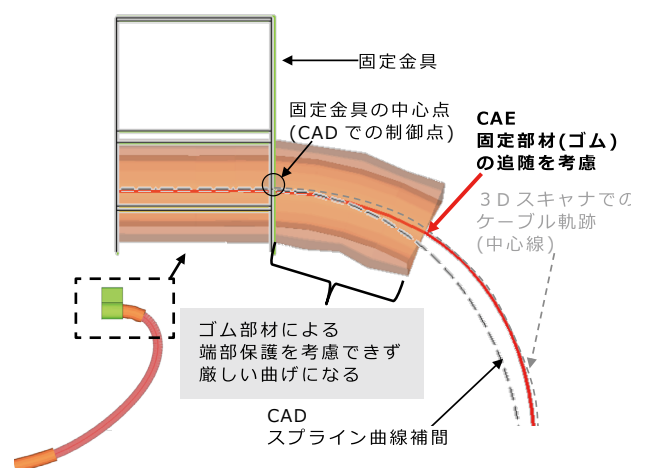


図7 3Dスキャナとの比較(例:フルバウンド時)

のマンドレル（一定の曲率半径を与える円柱状治具）に沿わせて曲げる繰り返し屈曲試験を行い、実測の寿命データ（S-N線図）を求めた。次に、②両端のみ固定して両端間はフリーのケーブルの屈曲寿命を求め、同時にCAEによる形状シミュレーションから導体歪み量を算定した。②を①と同じグラフにプロットしたところS-N線図上に乗り、導体歪み量はCAEで正しく算定できるとわかった（図8、①=灰色の実線、②=白丸）。

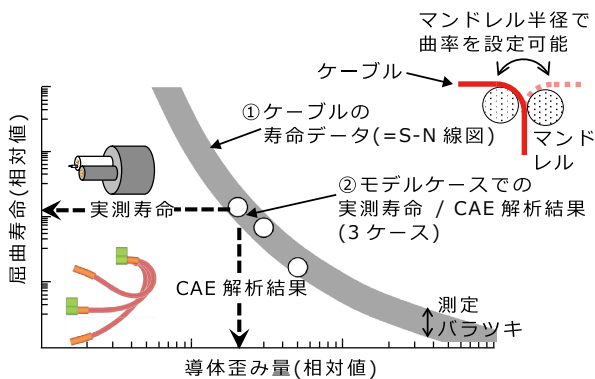


図8 寿命曲線と解析結果

5. CAE解析技術の活用

今回開発した解析技術により、実車配策形状の屈曲負荷を精度良く算定できるようになり、屈曲負荷に見合う最適なケーブル設計にすることで、試作/評価の合わせ込みを行う回数を低減でき、開発期間を20~30%短縮できた。

また、顧客の最適な実車配策形状提案にも活用している。例えば、屈曲負荷が過度に高く、適正コストでのケーブル開発が困難な場合に、屈曲負荷が低減する方向への実車配策形状の改善提案を行っている。

6. 結 言

自動車の電動化、先進運転支援システム（ADAS）の技術開発が進展し、足廻りへの多芯複合ケーブルの採用が拡大している。ケーブルの訴求点は、繰り返し屈曲を受けても導体が断線しない高い耐屈曲性である。今回、ケーブルの両端を所定の位置・角度で固定した際の両端間の曲げ形状、屈曲負荷を精度良く算定できるCAE解析技術を確立した。算定精度は、ケーブル曲げ形状の3Dスキャナによる実測が形状シミュレーションと一致することなどで確認した。

本技術により、試作/評価での合わせ込みを重ねることなく耐屈曲性を満足するケーブル設計や実車配策形状の提案が可能となった。本技術は、更なる自動車の電動化、ひいては自動運転車の開発にも活かされるものと考えられる。

用語集

※1 スプライン曲線補間

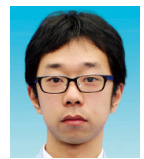
コンピュータグラフィックスにおいて、曲線を簡便に描く表現方法の一つ。任意の制御点を設定すると、全ての制御点を通る滑らかな曲線を描くことができる。

参考文献

(1) 高橋幸伯、「基礎 材料力学」、培風館（2004）

執筆者

松村友多佳*：エネルギー・電子材料研究所
主査



藤田 太郎：エネルギー・電子材料研究所
グループ長



山内 雅晃：エネルギー・電子材料研究所
部長



大嶋 拓実：住友電工電子ワイヤー(株)



八木澤 丈：住友電工電子ワイヤー(株)
課長



越智 祐司：住友電工電子ワイヤー(株)
部長



*主執筆