



CAEによるスチールコード・タイヤ性能予測技術

Performance Prediction Technologies for Steel Cord and Tire Using CAE

中島 徹也*
Tetsuya Nakajima

真鍋 賢
Ken Manabe

ゴム製品の補強材として用いられるスチールコードは、燃費、耐久性、操縦安定性、騒音対策等を高い水準で要求される自動車用タイヤにとって重要な部材である。従来の開発では、要求性能から適切なスチールコードを実証的に検討し、多くの評価を実施、必要に応じ修正するプロセスを繰り返していた。しかし、この手法では試作評価に膨大な手間、時間等のコストを要し、開発期間が長期化すること、廃却屑の発生等によりサステナブル社会の実現に向けた対応が困難であること、また、タイヤ性能はタイヤ設計因子の影響も受けることが課題となっていた。当社はスチールコード特性も反映できる性能予測技術を開発することで、これらの課題に対処した。結果、スチールコードを含むタイヤ設計における仕様検討、絞込み及び評価の技術的解釈を高い精度で効率よく実施可能となった。タイヤ性能向上、SDGsへの貢献を達成することにもつながり、顧客からも高く評価されている。

Steel cords, used as reinforcement in rubber products, are essential components for automotive tires that require high standards of fuel efficiency, durability, handling stability, and noise reduction. Conventionally, the development process involved repeated experiments, evaluations, and modifications to ensure the steel cords meet the required tire performance levels. However, this approach posed challenges such as extended development periods due to the time and effort required for evaluations, difficulties in achieving sustainable society due to tire waste, and the influence of tire design factors on tire performance. To address these issues, we developed a performance prediction technology that incorporates steel cord characteristics. This technology enables efficient and accurate examination, specification refinement, and narrowing-down and evaluation of technical interpretation in tire design involving steel cords. The technology not only enhances tire performance but also contributes to achieving the Sustainable Development Goals, earning high praise from our customers.

キーワード：スチールコード、タイヤ、予測技術、シミュレーション、SDGs

1. 緒言

自動車用タイヤは、多くの添加剤を複雑に配合したゴム、樹脂材料、補強用の繊維や金属ワイヤーを組み合わせで作られている。補強用繊維としてはポリエステル、ナイロン、アラミドやコットン等が、補強用金属ワイヤーとしては主にスチールが用いられている。スチールコードは①低コスト、②強度としなやかさを高次元で達成、③高い圧縮剛性、と言ったメリットを有するため、タイヤ構成部材として欠かすことのできないものとなっている。

近年、自動車の進化は目覚ましく、低環境負荷であることはもはや当然として、電動化^{*1}やコネクテッド化^{*2}は普及段階を迎えており、更に自動運転技術についても実証試験が進められ実用化前夜の様相を呈している。このように自動車が大きく進化している中であっても、進む・曲がる・止まるという動作伝達にはタイヤが継続して使われており、求められる性能は更に厳しくなっている。低燃費、高耐久性、高性能及び低コストを実現すべく、各タイヤメーカーの開発競争もまたグローバルで熾烈を極める状況になっている。

高い要求性能を満たすためには、タイヤ設計時には数多くのパラメータを検討し、また確認のために数多くの評価を繰り返し実施する必要がある。ただし、その評価を行う

にはかなりの手間や時間等のコストが発生するため、考える限りのあらゆる組合せを試すことは現実的ではない。更に、昨今のSDGsの観点より、試作評価に投入するエネルギー、資源や廃却屑の削減も重要になってきている。加えて、設計パラメータの中には相反する関係となっているものもあり、ある種の妥協を強いられる状況も発生しうる。このように、タイヤとしての製品性能だけでなく、その開発プロセスも含めた課題に応えるためには、これまでとは違う手法が必要となっていた。

我々は、これらの課題に対して、スチールコードの特性を反映することが可能なシミュレーション技術を開発した。この技術を用いることで、要求性能を満たすスチールコード及びタイヤを高い精度かつ効率的に設計できるようになり、タイヤ性能の向上も果たすことに成功し、顧客からも非常に高く評価されている。その内容について、次から報告する。

2. 自動車用タイヤとスチールコード

2-1 自動車用タイヤの構造

一般的なタイヤの構造を図1に示す。この中で、スチールコードはタイヤ外周部を周方向に補強する「ベルト（ブ

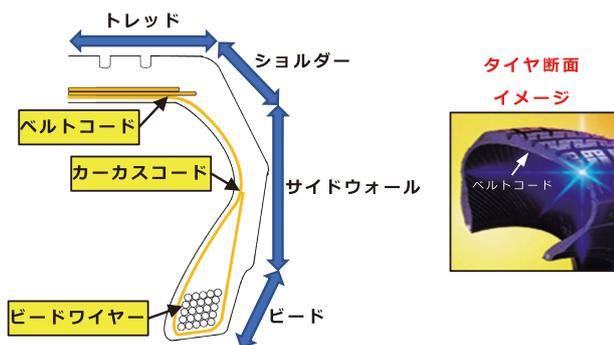


図1 自動車用タイヤの断面構造模式図

レーカー)」、タイヤ側面～トレッド面を放射方向に補強する「カーカス (プライ)」に用いられる。

ベルトやカーカスコードには、繊維やスチール等の素材で構成された撚線が使われている。撚線を使用するのは、強度、柔軟性及び耐疲労性を同時に達成できることが主な理由である。近年、アラミド繊維やカーボンファイバーなどの繊維素材が開発され、様々な製品に用いられるようになってきているが、自動車用タイヤでは、高速性能、操縦安定性及び乗り心地などの要求特性を高次元で達成でき、かつ低コストであることから、スチールがほぼ例外なく採用されている。

2-2 スチールコード及び使用法

スチールコード (写真1) とは、 $\phi 0.15\sim 0.40\text{mm}$ 前後の高炭素鋼素線を数本～数十本撚り合わせた撚線である。



写真1 スチールコード拡大写真

素線表面には伸線工程での加工性確保、及びゴムとの接着性^{*3}確保のため、銅 (Cu) と亜鉛 (Zn) を合金化したブラス (真鍮) めっきが施されている。

一般に、製品はリールに巻かれた状態で出荷され (写真2)、タイヤ製造工程では数10～数100、多いものは1,000リール以上を1ロットとして使用する。



写真2 スチールコード製品外観 (リール)

スチールコードは、汎用コードとカスタマイズコードの2種に大別できる。汎用コードは、世界中のスチールコードメーカーが基本同一仕様で製造販売している。一方、カスタマイズコードは顧客要望に合わせ、必要な特性 (コード径、強度、伸び、剛性等) を基にコード構成を設計し、製造販売しているものである。

これらのスチールコードを、複数本ゴムに埋め込みシート状に加工したもの (写真3) が、タイヤの補強部材として組み込まれ、使用されている。

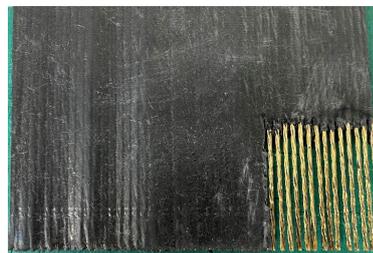


写真3 スチールコードが埋め込まれたゴムシート

3. 自動車用タイヤを取巻く環境とニーズ

タイヤは世界各地で製造、使用されており、自動車自体の進化、多様化、自動車社会の拡大、発展に伴い、今後も益々増えていくことが予想される。

自動車の進化、多様化に伴い車種 (コンパクトカー、ハッチバック、SUV、ミニバン等)、動力源 (ガソリンエンジン、ディーゼルエンジン、ハイブリッド、バッテリー+電気モーター (EV:電気自動車) 等)、及び大きさ (軽自動車、普通自動車、トラック、バス等) のバリエーションは豊富である。更に、自動車の使い方、使用環境 (気温、湿度、路面状態等) も含めると要求される条件は様々であり、タイヤに求められる特性もまた多岐にわたるものとなる。

このような環境において、様々な要求特性の全てに単一仕様のタイヤで対応するのは事実上不可能である。そこで、

各タイヤメーカーは使用部材や構造等を検討、設計し様々な種類のタイヤを作り込んでいる。しかしながら、前述の通りタイヤの設計には数多くパラメータを検討する必要があり、試作評価まで含めるとその作業量は膨大なものとなる。従って、効率的に設計評価を進める手法の確立が渴望されていた。

4. スチールコード開発プロセス

前述の通り、スチールコードの開発は、数多くのプロセスを経て行われている。ここで、従来のカスタマイズコードを開発する際の流れを図2に示す。

スチールコードは、タイヤ要求性能を受け検討、試作し、タイヤの評価結果をフィードバックし、必要であれば再設計・再試作を行うというプロセスを繰り返し、開発を進めていく。

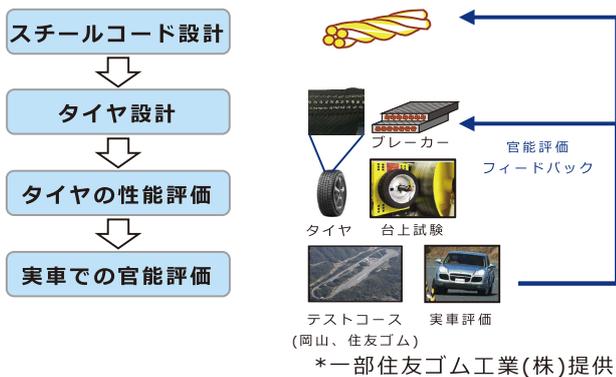


図2 スチールコード開発の流れ

ここで、コード及びタイヤの設計パラメータのうち、主なものを表1に記す。

表からわかるように、設計パラメータはコード、タイヤいづれについても数多く存在する。これらのパラメータを適

表1 コード及びタイヤの主な設計パラメータ

	機能・特性	設計パラメータ
スチールコード	コード径 強度 伸び 剛性 ゴム浸透度	材料強度 素線径 撚り本数 撚り構成 撚りピッチ 型付け(癖付け) 偏平加工等
タイヤ *参考	転がり抵抗 重量 剛性 操縦安定性 耐久性	エンズ アングル ゲージ厚 補強 ゴム配合等 *コード関連のみ記載

切に制御し、要求特性を満たすタイヤ開発を効率的に行っていく必要がある。

当社は、これらの課題に対し、スチールコードの特性を織り込むことが可能なシミュレーション技術が有効であると考え、「CAE^{*4}によるスチールコード・タイヤ性能予測技術」の開発に取り組んだ。

5. スチールコード性能予測CAE技術の開発

5-1 開発の取り組み

スチールコード性能予測CAE技術開発にあたり、アウトプットされる特性を検討する必要がある。我々は、大きく①タイヤ性能、②タイヤ耐久性、の2つを設定した。①については、表1中の転がり抵抗、重量及び操縦安定性、②については耐久性が相当すると思った。また、一般的にシミュレーションを実施する際は、計算リソース^{*5}を抑えるために、例えば今回のケースで言えばスチールコードを鉄板として扱うなど、できる限りシンプルなモデルを用いることが多い。しかしながら、これではスチールコードの持つ特性が結果に反映されない可能性が高い。そこで、我々はもう一つの狙いであるスチールコードの特性を反映させるため、スチールコードを素線形状単位で組み合わせることとした。

タイヤ中のスチールコードの挙動を予測するためには、スチールコード単体ではなく、スチールコードとゴムとの接着による相互作用を考慮する必要がある。それに伴い、スチールコード構成、スチールコードの埋め込み本数だけでなく、ゴムシートの厚み、アングル^{*6}といった様々な要因を考慮することが求められる。そこで下図のようなタイヤから一部を切り出したモデル（以下、ゴム付きコード）を考案した（図3）。この切り出しモデルの引張剛性・曲げ剛性・せん断剛性がタイヤ性能・タイヤ耐久性と相関があると考えた。スチールコードの形状について、複雑な撚り構造を持つ場合はCAD^{*7}上での作成が難しくなるが、実物をX線CT測定^{*8}して独自の解析処理を施したものをデータベース化し、活用することで対処した。ゴム付きコードモデルに与える境界条件については、タイヤメーカーで実施したタイヤのシミュレーション結果（図4）を用いた。

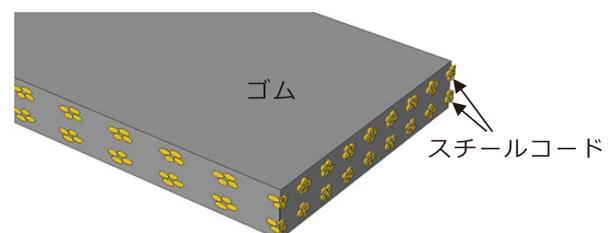
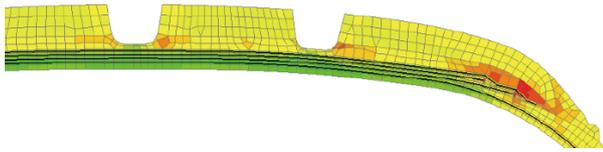


図3 切り出しモデル



*住友ゴム工業(株)提供

図4 タイヤのシミュレーション結果

5-2 スチールコードモデル

スチールコードはゴムとの密着性を高めるため、素線に癖付けを施す等、素線同士の隙間を広くすることがあり、理想的な螺旋軌道では無いことも多い。このような場合は、実物からX線CT測定を行うことで実形状を取得した。X線CT測定における解像度の制約で、フィラメント^{*9}同士が接触していたり、干渉しているように見えることもある。その場合は、フィラメントの軌跡を独自に開発した画像分析と補正技術を用いることで、この問題を回避した。分析、補正したデータを用いることで、複雑な撚り構造であっても、現実を模擬したモデルを作成可能となった(図5)。

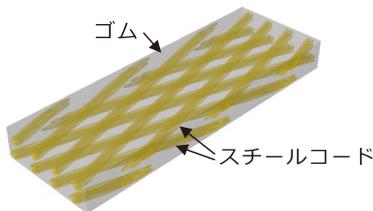
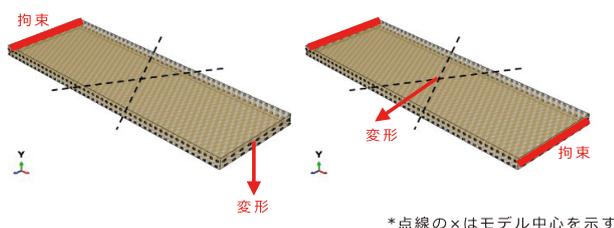


図5 スチールコードモデル例(2層ベルトモデル)

5-3 タイヤ性能予測モデル

タイヤには凹凸を含む路面を包み込んでグリップ力を発揮することと、コーナーを曲がる時のコーナリングパワー^{*10}が求められる。タイヤのシミュレーション結果に基づき、ゴム付きコードモデルに置き換えて考えると、曲げ剛性が低いこととせん断剛性が高いことが求められる(図6)。



*点線の×はモデル中心を示す

図6 タイヤ性能予測モデル(左:曲げ剛性、右:せん断剛性)

5-4 タイヤ耐久性予測モデル

タイヤの耐久性を上げるためには、スチールコードとゴムの密着力を上げることが重要である。スチールコードとゴムの界面にかかる応力を算出できるモデル(図7)を開発した。

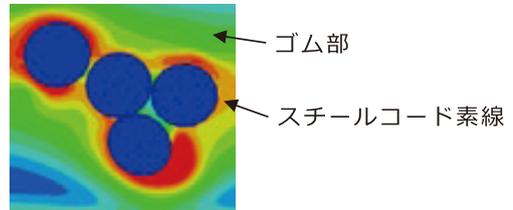


図7 スチールコード/ゴム界面の応力モデル

5-5 CAEと実評価結果の整合性確認

CAEモデルの妥当性については、実際にタイヤを試作し評価を行い、その結果との整合性を性能(図8)、耐久性(図9)それぞれで確認した。

CAEモデル確立のためには、いくつかの設計パラメータを変更したタイヤの評価結果と組み合わせる必要があったが、多くの試作、CAEモデル修正を繰り返し、最終的にタ

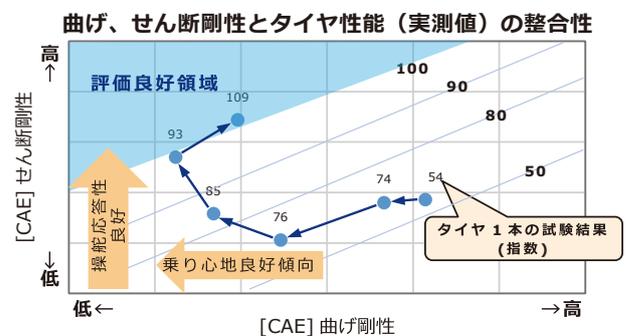


図8 CAEとタイヤ性能(実測値)の整合性

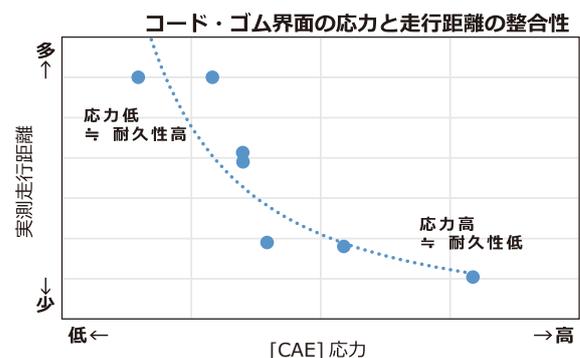


図9 CAEとタイヤ耐久性の整合性

イヤの性能、耐久性を概ね予測できる CAE 技術を確立させることができた。

6. スチールコード、タイヤ設計への活用

確立した CAE 技術を、新たなスチールコード、タイヤ設計に活用させた。前述の通り、タイヤ側のニーズ、性能ターゲットを受け、コードを設計した。従来はここから数多くの試作評価に入るところ、CAE を用いることで数多くの条件を短時間で検討することができた。更に、設計パラメータのトレードオフや限界点の見極め、製造バラツきの許容値の把握などにも活用し、試作評価を行う条件の絞り込みに効力を発揮した。

今回構築した CAE は、既に量産投入されており、その評判も上々と聞いている。更に次世代のタイヤ設計にも活躍しており、顧客からも高く評価され、また大きな期待が寄せられている。

7. 結 言

ますます激化する開発競争、大きく変化する環境の中において、様々な要求事項やニーズに応えるため、当社はスチールコードの特性を反映させることのできる、性能予測シミュレーション技術を開発した。従来、数多くの時間、手間及び資源を投入する必要があったプロセスを大幅に削減することができ、性能向上だけでなく SDGs にも貢献できたと考えている。

今後、自動車を取り巻く環境は変化のスピードがさらに加速し、要求も益々高まってくることが予想される。それらに対応すべく、更なる性能向上が必要不可欠になっていくことは明らかである。本技術は、これからの時代のニーズにマッチした高性能タイヤの開発に不可欠なものとなることを確信している。

8. 謝 辞

本稿は、住友ゴム工業(株)との開発協業活動の中で生まれ、改良してきた技術についてまとめたものである。タイヤシミュレーションや試作評価、また結果の解釈や議論等に御協力いただき、ここに深く感謝の意を表する。

用語集

※1 電動化

自動車の動力源が、ガソリンやディーゼルエンジン等の内燃機関から、EV (Electric Vehicle : 電気自動車) 等の電動機になること。

※2 コネクテッド

通信機能を持ち、ネットワークへの接続が可能な自動車。

※3 接着

めっき中の銅 (Cu) とゴム中の硫黄 (S) が結合し、硫化銅 (Cu_xS) が生成される、化学的な接着反応。スチールコードとゴム間の密着に必須である。スチールコードとゴムの密着が十分でないと、タイヤが破損 (破裂) する危険性が高まるため、安全性確保のためにも極めて重要である。

※4 CAE

Computer Aided Engineering の略。コンピュータを用いて、設計、製造や工程の検討をシミュレーションするもの。

※5 計算リソース

ここでは、コンピュータの処理速度やメモリ容量などのハードウェア資源及び計算に必要な時間と定義している。

※6 アングル

タイヤの中にスチールコードを埋め込む際の角度。通常、タイヤ中のブレーカーコードは接地面に対し平行からある程度の角度が付けられている。

※7 CAD

Computer Aided Design の略。コンピュータを用いて設計を行うこと。

※8 X線CT

X線を用いて物体を走査し、コンピュータを用いて処理することで、物体の内部構造を画像としてする技術。

※9 フィラメント

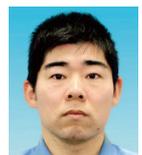
コード (撚線) を構成する個々の素線をフィラメントと呼ぶ。

※10 コーナリングパワー

タイヤの応答性を示す。コーナリングパワーが上がると、ハンドル操作に対する反応が良くなる。

執 筆 者

中島 徹也* : 特殊線事業部 主席



真鍋 賢 : 解析技術研究センター グループ長



*主執筆者