

タイヤの環境対応技術

佐 口 隆 成

タイヤは路面と接する唯一の車両部品であり、(1) 車両の重量を支持する、(2) 駆動力、制動力を伝達する、(3) 進行方向を転換・維持する、(4) 路面からの衝撃を緩和するという4つの大きな機能を有している¹⁾。近年は更に地球環境保護の観点からCO₂排出低減のための転がり抵抗低減が求められている。加えて、タイヤと道路の相互作用で発生する音はタイヤ道路騒音と呼ばれ住環境に直結する交通騒音の主要因の一つとなりつつあることから²⁾、タイヤにおける環境技術としては転がり抵抗の低減と低騒音化の両立が重要な課題となっている。本稿ではタイヤの低転がり化手法とタイヤ道路騒音の発生原因を述べる。また、タイヤの低転がり化がタイヤ道路騒音に与える影響と、それに対する取り組みに関し紹介する。

キーワード：タイヤ、タイヤ転がり抵抗、低転がり化手法、タイヤ道路騒音

1. タイヤの基本構造

タイヤの外観上の特徴の一つは、路面と接するトレッド部に通常パターンと呼ばれるタイヤ独特の溝模様がある点である。この溝により湿潤路上でも排水性を確保し、これによって路面とのグリップ性を保つことができる。それ以外には特徴のないドーナツ状をした黒いゴムの塊であるが、その内部は図-1のように複数の部材、ゴムが配設されている複合材料構造体であり、空気圧を保持した状態で使用される压力容器である。空気圧を保持する強度を保ちつつ荷重を保持し外乱を緩和する機能を果たすため、通常カーカスは有機繊維にゴムが被覆された一方向強化材を用いる。またベルトと呼ばれる部材が回転方向にタガ効果を発揮してタイヤ形状を保持している。ベルト部は通常スチール又は有機繊維コードとゴムからなる一方向強化材が用いられ、全体として積層複合材としての物理挙

動を發揮する。ビード部はホイールと嵌合して空気圧を保持しながら制駆動力などの外力を路面へ伝達する。トレッド部とビード部を結ぶ部分はサイド部と呼ばれ、大変形することで外乱を緩衝する。これら骨格部材の構造剛性と空気圧により発生する張力、及びその分布がタイヤ全体剛性を支配する因子であり、これらを組み合わせることで種々の性能をコントロールすることができる。

またゴムやスチール材、繊維材はそれぞれの機能ごとに異なる種類が用いられ、例えばカーカスの内側に配置されるインナーライナーは空気保持を目的にしているため空気透過性の低いブチルゴムを用いる。同様にトレッド部、サイド部、ビード部などを形成する部材もそれぞれの機能に応じて異なる材質が用いられる¹⁾。

タイヤと路面の接触面積は葉書1枚程度であり、乗用車では葉書4枚分の接地面積で車重を支えながらブレーキやコーナリングなどの性能を満足させなくてはならない。特に「タイヤは命を乗せている」ことから、様々な使用条件や環境下での耐久性や摩耗性能を考慮し慎重に技術開発が進められる。

2. タイヤの低転がり化手法

車の燃費にはエンジンや駆動伝達系の寄与が大きいですが、一般的にはタイヤの転がり抵抗も市街地走行の場合に約1割、定常走行の場合には1/4程度の寄与があるといわれている³⁾。そのタイヤの転がり抵抗は、タ

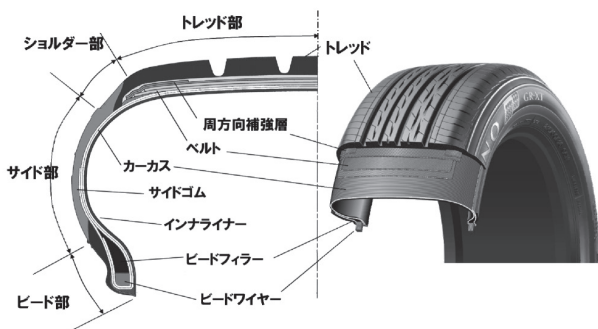


図-1 乗用車タイヤの基本構造と名称

イヤが路面と接するときに発生する「摩擦による損失」よりも、タイヤが回転中に繰り返し変形することに起因する「ゴムのエネルギー損失」の寄与が大きく90%以上を占めると考えられている⁴⁾。そのため繰り返し変形による損失を低減することが最も重要な課題となる。この繰り返し変形による損失は、主にゴムが高分子材料であり粘弾性特性を有することに起因する。弾性体であれば荷重付加時と除荷時に同じ変位-荷重経路を通るが、粘弾性体は異なった経路を通る。この経路の違いによって変形が熱エネルギーに変換されエネルギーが損失する。これはヒステリシスロスと呼ばれ上記のようにゴムなど高分子材料が有する特徴である^{1), 5)}。これらのことからタイヤの転がり抵抗を低減するためには、大きく(1)高分子材料の特性の制御と体積低減(軽量化)及び(2)タイヤの変形制御が必要であるといえる。

まず材料特性の制御に関し説明する。タイヤに用いられるゴムは、天然ゴムや合成ゴムにカーボンブラックやシリカ補強材を配合した加硫ゴムである。このようなゴムにおけるエネルギーロスの発生要因を分子レベルでみると、ポリマーに配合された充填剤粒子の配列変化(ペイン効果)、ポリマーの自由鎖末端の熱運動、ポリマー鎖中のセグメント同士の摩擦などが挙げられる。転がり抵抗には繰り返し変形が速度に比例する数十Hz程度で作用しており常温でのゴムの $\tan \delta$ (損失係数)の寄与が大きい。一方、安全性として重要な湿潤路(ウエット路)での制動特性を考えると、タイヤ接地部分に作用する路面のマクロな凹凸による振動数は1万~100万Hzに相当する。そこで転がり抵抗を抑制しウエット路面でのブレーキ性能を向上させるためには、低周波数帯域での $\tan \delta$ を小さくし高周波数帯域での $\tan \delta$ を大きくすればよい。ゴムの粘弾性は温度-周波数換算則が成り立ち、実用上は温度による換算を用いながら周波数の異なる領域の材料特性を制御することで、タイヤにおける転がり抵抗と安全性の両立を果たしている(図-2)⁵⁾。近年では材料の微細構造を制御して特性を引き出すために、分析・解析、計算科学、原材料設計技術から成るNanoPro-Tech[®]等が提案されており、ナノレベルでの微細構造制御が進んでいる。

またエネルギーを熱に変換する部位を低減するというだけでなく、地球資源の効率的活用(省資源)の観点からもゴムの体積(使用量)を減少させることは重要である。このためには走行に伴うゴムの摩耗の抑制が必要であり、ゴム物性の面からだけでも複数の要因を同時に成り立たせる技術が必要である。見た目だけではわからないが、最新のゴムは図-2に示すよ

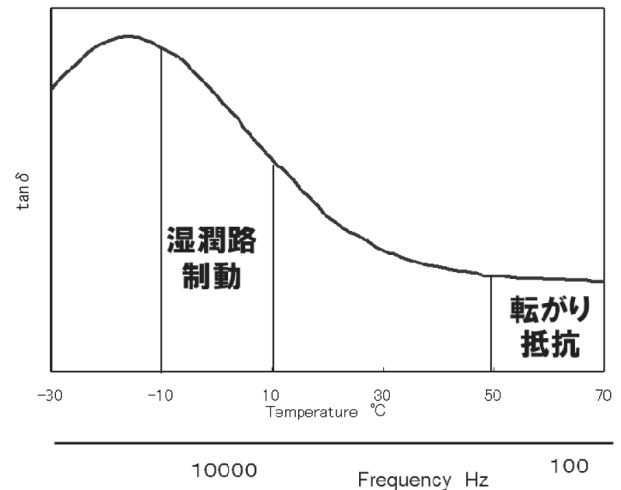


図-2 ゴム $\tan \delta$ と転がり抵抗, 湿潤路制動性能

うな材料特性を両立させ転がり抵抗と安全性をとりながら、更に適切にポリマーの高分子鎖を補強することで摩耗性能も向上させ、省資源化(軽量化)を図っている。

次にタイヤの変形制御及び車両としての燃費向上の取り組みを紹介する。タイヤの周方向変形は図-3に示すように偏心変形(1次変形)と回転方向の高次曲げ変形に大別できる。一般にエネルギーロスはトレッド部で大きく発生するため、トレッド部の変形が小さい偏心変形の占める割合をタイヤ変形の中で大きくすることで転がり抵抗を低減することができる。そのため、素材や構造によりベルト部やサイド部の構造剛性分布を制御するほか、タイヤ形状による張力剛性分布の制御をおこない低転がり抵抗化を実現している。

また燃費向上を目的としたタイヤ技術による車両全体重量の低減手法として、パンクしても一定距離の走行が可能なランフラットタイヤの装着によるスペアタイヤレス化による軽量化や、トラック用タイヤを複輪から単輪化することによる軽量化、低転がり化を実現する取り組みがなされている⁵⁾。

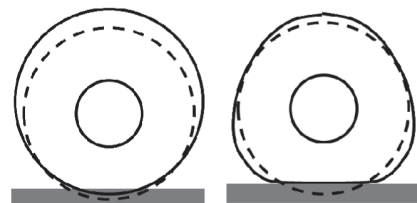
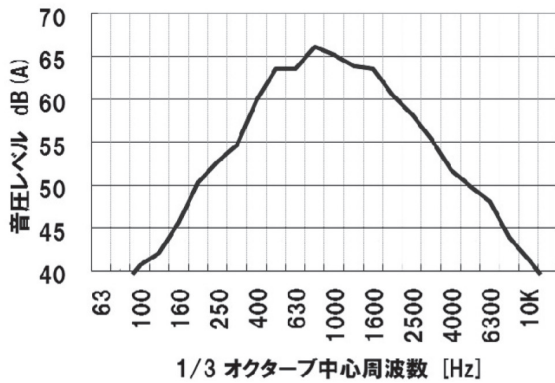


図-3 タイヤの変形モード(左: 偏心変形, 右: 高次曲げ変形の例)

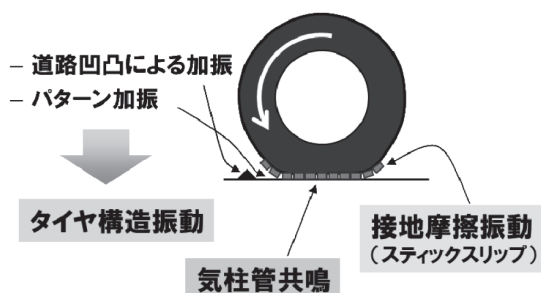
3. タイヤ道路騒音の発生メカニズム

冒頭に記した通り、低転がり化とタイヤ道路騒音の両立は環境面から重要な課題である。タイヤ道路騒音



図一4 タイヤ道路騒音の典型的なスペクトル

の典型的なスペクトルを図一4に示す。スペクトルは1kHz付近にブロードなピークを持つことが多いが、単一の要因ではなく種々の要因がタイヤ道路騒音に寄与している。タイヤ道路騒音の発生メカニズムを模式的に図一5に示す。主要な入力源は路面とタイヤトレッドが接触することにより発生し、タイヤ起因のパターン加振成分と路面起因の路面凹凸加振成分が存在する。これらの入力によりタイヤ構造振動、路面とタイヤの溝が形成する音響空間の共鳴(気柱管共鳴)などが励起される。更にトレッド部が路面から離脱する際、スリップすることにより発生する接地摩擦振動も騒音発生の要因となる。またタイヤ形状そのものと路面により形成されるホーン型の音響空間⁶⁾は音響増幅フィルターとして作用する。これら数々の要因により発生したタイヤ道路騒音は、車両外側に伝播して道路交通騒音として認識される。タイヤ道路騒音の名が示すとおりこの騒音は道路(路面)の影響も強く受けることが知られている。この中で特に寄与の高い因子は路面粗さと吸音率であり、それぞれ路面凹凸加振成分及び、気柱管共鳴・ホーン効果に対する境界条件として大きな影響を及ぼす^{2), 7)}。そのため路面からも検討が進められ、多孔質舗装(排水性舗装)によって道路交通騒音が大きく低減することが分かっており幹線道路の低騒音舗装としても普及している。しかしながら、ここでは特にタイヤ面からタイヤ道路騒音を論ずるものとして、道路・路面の影響の詳細は省略する。



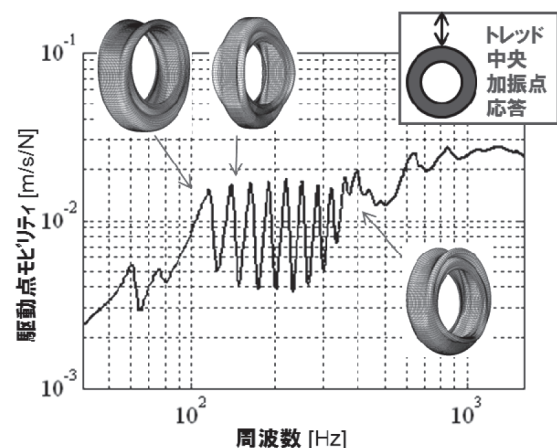
図一5 タイヤ道路騒音の発生メカニズム

4. 低転がりタイヤにおける低騒音化への取り組み

2. で述べたようにタイヤの低転がり化は種々の手法で実現される。従って、タイヤの転がり抵抗低減とタイヤ道路騒音低減は常に背反するものではなく、転がり抵抗低減の手法のそれぞれがタイヤ道路騒音の各要因にどのような影響を及ぼすか、正しく理解して設計する必要がある。例えばトレッドゴムでの低ロス化を実現するためにゴムに配合する補強材を減少すると加硫ゴムのヤング率は小さくなる。これは路面凹凸による加振成分の低減が期待できる。一方トレッドゴムの物性は一定のままトレッドゴムの厚さを薄くして軽量化すると、パターン溝が減少する分パターン加振成分は小さくなるがゴムが薄くなった分硬さが変化し路面凹凸加振成分は大きくなる。よって対象における各要因の定量的な寄与率が重要となる。一般的にタイヤ転がり抵抗の低減とタイヤ道路騒音の両立化においては、トレッド厚さの減少(軽量化)に伴うタイヤ振動特性のコントロール及び、路面凹凸加振成分の悪化の抑制が主な課題となる。

タイヤはゴム及び補強材によって構成され、図一1に示すようにその断面は複雑であり、かつゴムによる高減衰性を有する周期(均一)構造物である。代表的なタイヤの振動特性(駆動点モビリティ)を図一6に示す。低周波ではタイヤのマクロな変形を伴う振動モードが支配的であるが、タイヤ道路騒音を支配する中～高周波域では高次モードが出現し、回転方向及び断面に複数の節を持つ複雑な変形モードになる。また高分子材料の高減衰性故にモード密度が高くなり、特定のモードが卓越しないブロードな振動応答となる点が特徴的である。

簡単のためタイヤをシェル構造物と考えると、シェ



図一6 タイヤの代表的な振動特性

ル構造では曲げ振動に面内振動が連成することが知られている⁸⁾。この影響でシェル構造物では、高周波においても曲げ振動成分が主体となる波長の短い振動成分と面内振動が主体となる波長の長い成分が混在する。音響放射効率に影響を及ぼすコインシデンス効果⁹⁾を考慮すると、振動波長の長い成分が振動放射音の支配要因であることが多い。従ってタイヤにおいても振動放射音の低減のためには、振動場を形成する様々な振動成分のうち特に波長の長い振動成分を制御する必要があるといえる。

次に加振入力成分の低減について述べる。ゴム物性以外で低減するためにはトレッドパターンの幾何学的形状による路面凹凸成分の緩和が重要である。これを実現するための設計手法として、サイプと呼ばれる幅の狭い溝成分を用いることでタイヤトレッド部の圧縮剛性を低減する手法がある。ただしサイプ自身が存在することによるパターン加振成分の増加、主要な溝で形成される開空間に貫通しないサイプはポンピングノイズと呼ばれる急激な空気の圧縮膨張によるインパルスの発生要因となるなどデメリットも有する。加えて、トレッド剛性の変化はタイヤと路面唯一の接触面での変化であり、制動性能、摩耗性能など多くの性能に影響を及ぼすため、パターンデザインにおいてサイプ等の配設は慎重に決定されている。

また、低転がりタイヤにおいても重要なタイヤ道路騒音の因子の一つに気柱管共鳴音がある。これは、タイヤが荷重負荷された状態で溝と路面が形成する音響空間が共鳴するものである(図-7)。気柱管共鳴の共鳴周波数は接地長によってのみ決定され、その基本共鳴周波数は乗用車タイヤで約1kHz位である。この気柱管共鳴音を低減するための手法としてたとえばタイヤのパターンに共鳴器を用いるデザインが提案されている(図-8)^{10), 11)}。このようなパターンデザインにより共鳴器による減衰効果が得られ騒音レベルを低減できる。

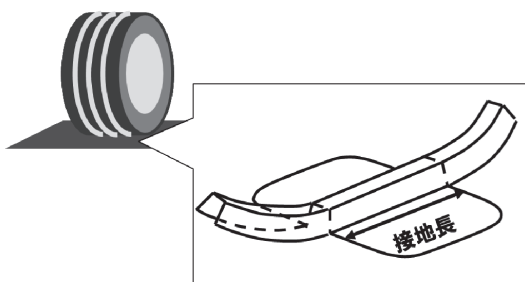


図-7 道路とタイヤ溝の形成する音響空間



図-8 共鳴器の適用事例

5. おわりに

タイヤは唯一路面と接し車両を支える部品である。従って多くの性能を發揮しながら、更なる性能向上が必要とされている。その中でも近年の環境から転がり抵抗低減は必須であるが、同時に交通騒音の改善も緊急の課題となっている。

本稿ではこのタイヤ転がり抵抗低減のための取り組みとタイヤ道路騒音について述べた。特に低転がり化(軽量化)で背反するタイヤ道路騒音低減の取り組みには(株)ブリヂストンの事例を基に紹介した。

JICMA

《参考文献》

- 1) (株)ブリヂストン編, “自動車用タイヤの基礎と実際”, 東京電機大学出版局, 2008
- 2) (社)日本自動車タイヤ協会, “タイヤ道路騒音について”, 第7版, TNTC/03/004, 2004
- 3) 横浜ゴム(株), “自動車用タイヤの研究”, 山海堂, 1995
- 4) 服部, “タイヤの話”, 大成社, 1981
- 5) 大沢, “タイヤによる燃費向上技術”, エンジンテクノロジーレビュー, Vol. 2, No.2, 2010 (ISSN 1884-1961)
- 6) 例えば F. Fahy, “Foundations of Engineering Acoustics”, Elsevier, Academic Press, 2001
- 7) U. Sandberg, J. A. Ejsmont, “Tyre/road noise reference book”, Infomex, 2002 (ISBN 91-631-2610-9)
- 8) 例えば 鈴木, 山田, 成田, 齊藤, “シェルの振動入門”, コロナ社, 1996
- 9) 例えば F. Fahy, P. Gardonio, “Sound and structural vibration”, second edition, Academic Press, 2007
- 10) S. Fujiwara, K. Yumii, T. Saguchi, K. Kato, “Reduction of Groove Noise of a Tire Using Slot Resonators”, Tire Sci. Tech., 2008
- 11) A. Kitahara, T. Akashi, Y. Waki, H. Heguri, “Interior noise reduction by tire surface geometry and Helmholtz resonators on tread patterns”, Proc. Internoise2011, Osaka, 2011

【筆者紹介】

佐口 隆成 (さぐち たかなり)
(株)ブリヂストン 中央研究所
研究第2部長

