

毛利 浩

Optimized Laboratory Test Condition to Predict Tire Tread Wear

Hiroshi MOURI (Rubber Consultant, Tokyo, Japan) mourihiroshi@hotmail.co.jp

Laboratory test condition to predict tire tread wear was discussed, using the FPS wear test equipment manufactured by Ueshima Seisakusho Co. Ltd. Sample load was determined based on the sample dynamic footprint and inflation pressure of different tire groups. Most tire groups evaluate wear rate by volume loss per distance with the exception of giant mining tires which evaluate volume loss per hours. In light of truck, bus and passenger tires, the laboratory test in the present paper employed the volume loss per distance. In such case, slip ratio correlated with wear rate better than slip speed. The surface of the worn sample and wear debris indicated that the laboratory wear mechanism was identical to road wear mechanism which was considered plastic wear (P-wear) instead of the conventional elastic wear (E-wear).

(Received on April 6, 2021)

(Accepted on July 13, 2021)

Key Words : Laboratory Tread Wear, Slip Ratio, Wear Debris, Worn Surface

1. 緒 言

1.1 摩耗試験機

摩耗のメカニズムとそのゴム試験法に関する研究は空気入りタイヤの出現以来一世紀以上にわたり行われてきており、未だに新たな報告が枚挙にいとまがない程、盛んに研究が行われている。ISO23794:2015にはアクリロン摩耗はじめランボーン摩耗、DIN摩耗など14種類ものゴム摩耗試験法の一般的概要が規格化されている。対応するJIS規格はJISK6264であり、内容はほぼ同じである。タイヤの耐摩耗性を評価するには路面とゴムサンプルの間に滑りが生じるアクリロン摩耗やランボーン摩耗が適している。タイヤの摩耗テスト結果と相関のある摩耗試験機の提案は歴史的にはLambourn¹⁾から始まり、既に1927年には摩耗の温度依存性など多岐にわたる検討がなされている。Lambournの結果をグラフにしたのが図1であり、この当時からゴムの摩耗試験結果とタイヤテスト結果は良い相関が得られており、相関係数は $R^2 = 0.96$ と高い。

スリップ速度、スリップ率、摩擦係数の定義を式 (1)、

(2), (3) に示す。

$$\text{スリップ速度} = \text{サンプル速度} - \text{ドラム速度} \quad (1)$$

$$\text{スリップ率 (\%)} = \text{スリップ速度} / \text{サンプル速度} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{摩擦係数 } (\mu) = F_y / F_z \quad (3)$$

ここに F_y はサンプルの回転方向の摩擦力、 F_z は垂直荷重

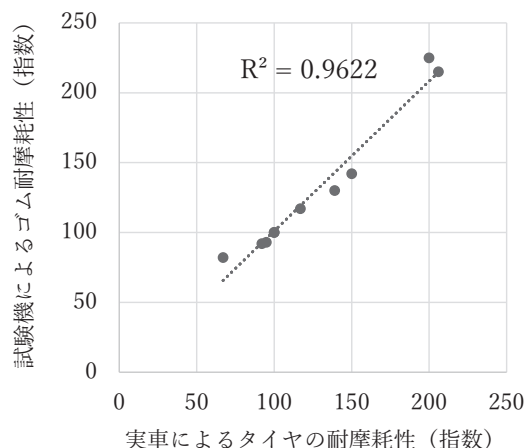


図1 Lambourn¹⁾による実車とゴム試験の耐摩耗性の相関

である。

ゴム摩耗試験条件としてスリップ率が16%の時に最も相関が高いとしている。通常走行でスリップ率は1%程度、山坂でたかだか4%程度としているが、高いスリップ率で相関が高いのは低い側のスリップ率は殆ど摩耗に寄与せず、制駆動、コーナリング時の高スリップ時に主に摩耗が起こるためとしている。しかし、これはこの当時のバイアスタイヤの話であり、現代のラジアルタイヤではLambournの報告対比大幅にスリップ率が低いことを本稿で述べる。Lambournが使用したゴムの詳細はリクレム（再生ゴム）を配合したこと以外の記載がなく不明であるが、耐摩耗性が2倍以上違うゴムを比較しており、現実的には小さな耐摩耗性の違いが有意差として見れるかどうかは定かでない。また特筆すべきはLambournが当初提案した試験機は応力一定の駆動方式となっていることである。以後、改良型Lambourn試験機辺りから二つのモーターを駆動する歪み一定の方式に代わっている。車両ではG（重力加速度を基準とした加速度の単位）として摩擦力を計測しているので本来は応力一定の駆動方式にするべきであるが、トレッドゴムの弾性率が大きく変動しない限り、スリップと摩擦力の関係はタイヤの構造、パターン、内圧でほぼ決まるので歪み一定の駆動方式でも差し支えない。

1.2 摩耗のメカニズム

Schallamach²⁻⁴⁾等によるとゴムの摩耗表面を観察すると摩擦の進行方向と直角な方向に縞模様状のアブレーションパターンが発生する。この機構はゴム片が突起を乗り越す際に粘着しながら突起に沿って弾性変形し、限界の摩擦力に達するとゴムが急激に滑って元の形状に戻るスティックスリップの現象に基づく。この動きが規則的に繰り返され、のこぎりの歯状のアブレーションパターンが発生する。これが長い間ゴムの摩耗機構とされてきた。

Veith³⁾によると摩耗はポリマーのガラス転移点と相関が高い。ガラス転移点の低いゴムは温度時間換算でいうと高周波数でも柔らかく振る舞うのでスティックスリップの過程でスリップする時の高速の変形に追従できるので破壊が起こりにくく、また滑りやすいのでアブレーションの間隔も狭く、耐摩耗性が向上する。このようにアブレーションパターンが発生する場合をelasticの頭文字を採りE摩耗、即ち弾性的な摩耗とした。

しかし必ずしもアブレーションパターンは発生せず、ラジアルタイヤで良く見られるのは単に小さなゴム片がもぎ取られた跡の穴があるような摩耗形態であり⁵⁾、突起に沿ってゴムが滑り、引っ掻きを受けて破壊に至る摩耗である。これをVeithはP摩耗、即ちゴムがプラスチックのように硬く振る舞う挙動とした。摩耗粉を集めると当然ではあるがこの穴と同じ大きさなのでゴム片がもぎ取られた跡であることがわかる。本検討結果からも同じようなP摩耗

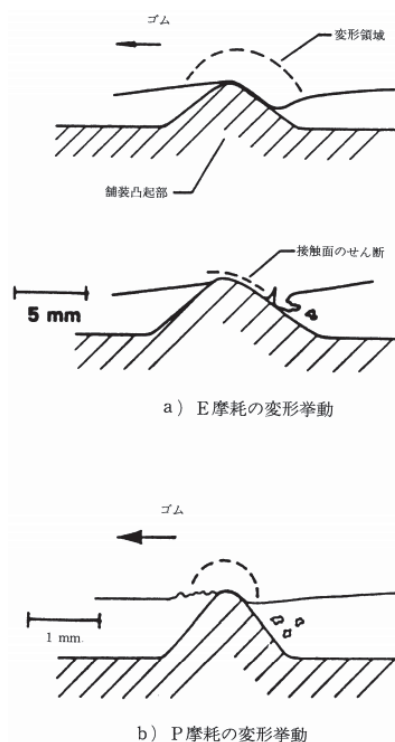


図2 Veithの摩耗機構³⁾

の摩耗形態が観察できたことを後半に述べる。VeithのE摩耗、P摩耗に対する考え方を図2に示す。

富樫ら⁵⁾によるとタイヤの廃品調査を行うとラジアルタイヤは殆どの場合がP摩耗である。そして摩耗がガラス転移温度と相関が高いのは摩耗の過酷度が高い場合、即ちE摩耗の場合だけであり、過酷度が低いとP摩耗に移行し、ガラス転移温度と摩耗はほぼ相関がなくなることを見出している⁶⁾。したがって乗用車用のバイアスタイヤでは耐摩耗性を改良するのにポリブタジエンなどのガラス転移点の低いゴムを多用したが、ラジアルタイヤでは効果が少ない。トラック、バスのラジアルタイヤでは駆動軸のように過酷度が高い場合にはアブレーションパターンが見られ、この場合にはポリブタジエンが有用である場合がある。しかし、近年は高速道路網も整備され、荷重規制が厳しくなり、速度超過も減ってきているのでガラス転移点の影響が殆どなくなっている。また、トラックの前輪、遊輪の一部で非常に過酷度の低い条件ではガラス転移点の高いスチレンブタジエンゴムを天然ゴムの代わりに使うと耐摩耗性が改善するばかりでなく偏摩耗性も改良され、タイヤライフが伸びる場合がある。この過酷度の低い走行条件を室内で再現するにはLambourn摩耗でスリップ率を落とすことが考えられるが試験に時間がかかり、ばらつきも大きいという問題があり実用的ではなかったがサンプルの自動交換機能を備えている試験機であれば低いスリップ率でも終夜運転で効率良く実施することができる。

1.3 摩耗の過酷度

乗用車の摩耗過酷度に関しては藤川ら^{13,14)}の測定結果に

よると前後方向の加速度分布は転がり抵抗による摩擦力に相当する0.01 G付近を中心に分布しており、第2のピークは減加速度、即ち制動時に起因する0.40 G付近にあり、摩耗は殆どその付近で起きているとされている。駆動時の加速度は制動時の加速度に比べると低く0.30 G付近にある。トラック・バスについては金子ら¹⁵⁾の検討によると大型車両の減加速度は0.7–1.1 G付近にある。Gは重力加速度を基準とした加速度の単位であり、進行方向に働く力と車両の重量の比であるので(3)式から摩擦係数に等しい。

Grosch^{7,8)}は摩耗の過酷度の分布を調べ、P摩耗を基本にスリップ速度に分布を持たせたプログラムを搭載し、アクロン摩耗を改良したLAT100を提唱した⁹⁾。実車とゴム摩耗試験の相関は $R^2 = 0.91$ と高い値を得ているが、これは耐摩耗性が2倍以上異なるゴムで幅広く検討した結果であり、小さな摩耗の差を精度よく検出できるかどうかは定かでない。

近年良く使われているFPS摩耗試験機(Field Performance Simulationの略)¹⁰⁾はLambournタイプのメカニズムを基本としており、ISO23337¹¹⁾、JIS6264-2が適用できる。摩擦部分の概略については図4に示してあるが、詳細はJIS6264-2を参照されたい。特徴として応力一定の駆動と歪み一定の両方の駆動方式を取ることができ、先に述べた新旧両タイプのLambourn試験を行うことができる。また、自動でサンプルの付け替えができるので時間のかかる低スリップ率のテストを夜間に一挙にできるので効率的である。更に繰り返し再現性が優れ、ISO23337のテスト結果によると改良型ランボーンの繰り返し精度が約10%であるのに対して本検討では繰り返し精度5%以内であることが判明している。Lambourn¹⁾によると試験法として必要な精度はCVが5%以内を望ましいとしているが、今までこれはそう簡単には実現できていなかった。この試験機は路面の温度が制御できるので特に高速で回転させた時の温度の振れによるバラツキを抑えることができるので繰り返し再現性が良いと考えられる。

本稿では上島製作所製のFPS摩耗試験機を用いてタイヤの入力に合わせた試験条件の設定を明らかにすることによりタイヤトレッドの耐摩耗性を再現することを目的とする。

2. 実 験

ISO2322 (SBR カーボンブラック標準配合)は老化防止剤が入っていないので通常タイヤトレッドに配合されている老化防止剤を加えた。これにより老化防止剤が入っていないことによる結果への影響を取り除いた。配合表を表1に示す。ロールで配合し、加硫条件は165℃×15分とし、厚みが10 mm、外径50 mmの摩耗試験用の円盤状のゴムサンプルを準備した。

表1 ISO2322に老化防止剤を添加したSBR標準配合

	PHR
SBR1502	100
カーボンブラック N330	50
酸化亜鉛	3
ステアリン酸	1
粉末硫黄	1.75
加硫促進剤 NS	1
老化防止剤 6C	1
合計	157.75

表2 スリップ率、スリップ速度を変えた摩耗試験条件

	サンプル速度 m/min	ドラム速度 m/min	スリップ率 %	スリップ速度 m/min
1	200	180	10	20
2	200	190	5	10
3	200	195	2.5	5
4	150	127.5	15	22.5
5	150	138.75	7.5	11.25
6	150	145.5	3	4.5
7	100	84	16	16
8	100	92	8	8
9	100	96	4	4
10	50	35	30	15
11	50	42.5	15	7.5
12	50	46.5	7	3.5
13	25	16.25	35	8.75

2.1 摩耗試験のスリップ速度、スリップ率依存性

このサンプルを用いてFPS摩耗試験機で表2のようにサンプル速度、ドラム速度を変えて摩耗速度のスリップ率、スリップ速度依存性を調べた。荷重は40 Nとし、ドラム温度30℃で温調を行い試験温度が上がらないように試験を実施した。実走タイヤの表面温度は通常条件では殆ど上昇しないことがわかっているので、このような摩擦熱を取り除く工夫が必要である。これは実車が常に走行路面が更新されるのに対してゴムの摩耗試験は同じ路面を繰り返し摩擦するので蓄熱し易いためである。本報告では傾向を捉えるためにスリップ率2.5–35%の広い範囲で実施した。実際に室内でタイヤの摩耗を予測する時には次に詳しく述べるが、スリップ率2.5–10%の範囲でテストを実施するのが望ましい。路面としては実路面と摩擦係数及び粗さが近いノリタケ製研磨ロール A240METABRITを使用した。すべてのサンプルは予備擦りをその条件の試験時間の5%で実施した。離型剤としてタルクを1時間当たり2.5グラムの流量でサンプルに吹き付け、路面の汚れを取るべく付帯されているブラシを回した。タルクの流量が十分でないとサンプルのべた付きが発生して摩耗粉が粉状から消しゴムのようにロール状に変わることがあるので注意しなければならない。摩耗量は100 mg ± 20 mgになるよう試験時間を設定した。またテスト完了したサンプルから摩耗粉の採取を行った。

2.2 結果と考察

結果を図3に示す。図3(a) からわかるように時間当た

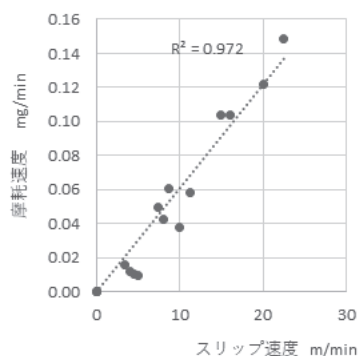


図3 (a)

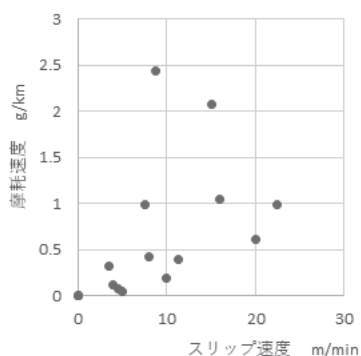


図3 (b)

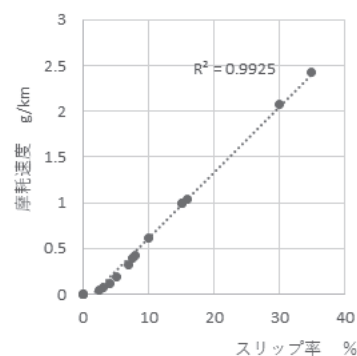


図3 (c)

図3 (a) 摩耗速度（時間当たりの摩耗量）とスリップ速度の関係
 図3 (b) 摩耗速度（距離当たりの摩耗量）とスリップ速度の関係
 図3 (c) 摩耗速度（距離当たりの摩耗量）とスリップ率の関係

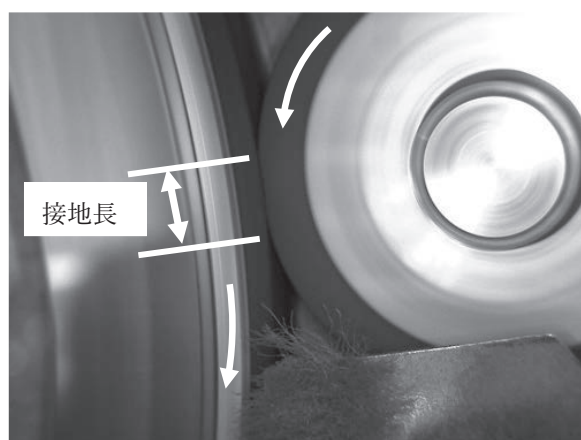


図4 高速で回転するサンプルの接地長（サンプル外径50 mm）

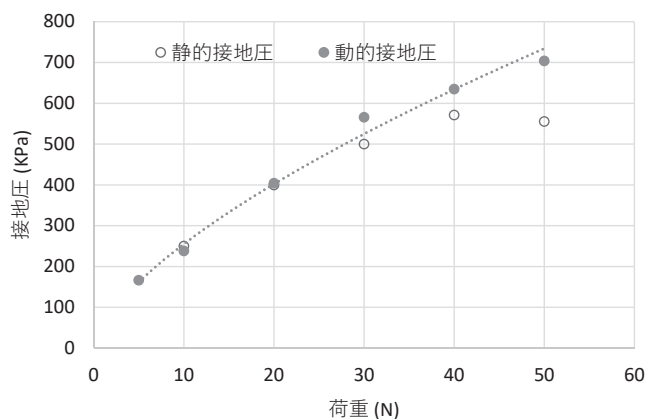


図5 接地圧の荷重依存性

りの摩耗速度（g/min）はスリップ速度と相関高い。しかし距離当たりの摩耗速度（g/km）は図3（b）に示すようにスリップ速度とは相関が全くなく、図3（c）に示すようにスリップ率との相関が高い。タイヤの摩耗の測定は通常一定の速度では走行しないため、また特に乗用車の場合、不稼働時間が長いので距離当たりの摩耗速度（mm/km）を測定するのが通常である¹²⁾。但し大型建設車両用タイヤは稼働率も高く一定の条件で走ることが多いので時間当たりの摩耗速度を測定するのが普通である。したがって乗用車、トラック、バスのゴム摩耗試験を実施する際には試験条件はスリップ速度よりもスリップ率で条件を設定することによりタイヤ実地走行で測定している摩耗速度に合わせることができる。速度一定のランボーン試験を行う場合はどちらの摩耗速度を使っても結果は同じになるが、LAT100の標準条件は速度を変えているので距離当たり摩耗速度（g/km）を使わなくてはならず、スリップ率を使うべきである。FPS摩耗試験は本稿のように速度を変えて実施する場合を考え、スリップ率で条件設定をすることが望ましい。

2.3 摩耗試験の荷重の設定

まずはゴムサンプルを静止しているドラムに所定の荷重

をかけ、その時のフットプリント（所謂魚拓）を取った。これを静的接地面積という。これに対して図4に示すようにドラム上を転動するサンプルを横から撮影し、その接地長にサンプルの幅を掛けたものを動的接地面積とした。荷重を接地面積で割った値が接地圧であり、図5に接地圧と荷重の関係を示した。静的接地面積に基づく接地圧は高荷重側で圧縮歪みの影響を受けて接地圧が低下し始めているので動的接地圧を用いるのが正しいといえる。

トラック、バスの内圧は700 KPa付近なので図5から接地圧700 KPaに相当する荷重40～50 Nでテスト実施し、乗用車の内圧は250 KPa付近なので図5から接地圧700 KPaに相当する荷重10～15 Nでテスト実施すれば良い。図6に示すように摩耗速度は荷重に大きく依存しているので荷重の設定は重要である。また摩耗速度はサンプル速度依存性が少なく殆ど荷重とスリップ率で決まっていることもわかる。

2.4 ゴム摩耗試験のスリップ率の設定

摩耗試験機でスリップ率と摩擦力の関係を調べたのが図7であり、先に述べた摩耗が主に起こる摩擦係数0.40に相当するスリップ率は図7から荷重によらず2.5%付近であることがわかる。このような低いスリップ率を摩耗試験機で

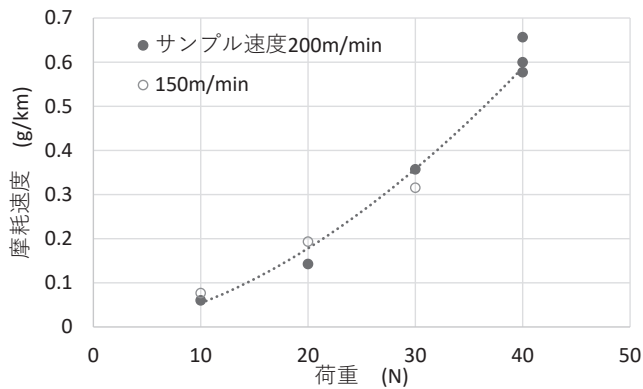


図6 摩耗速度の荷重依存性 (スリップ率10%)

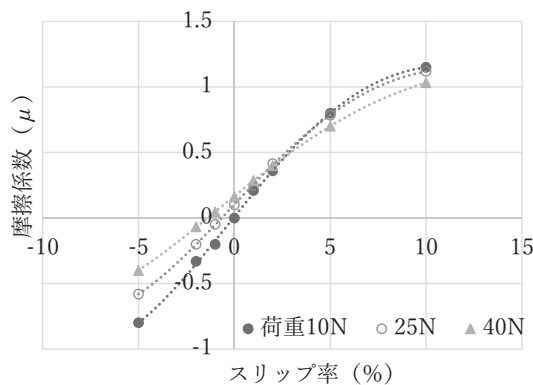


図7 FPS摩耗試験機のスリップ率と摩擦係数

設定することは可能であるが試験に時間がかかるため促進試験としては5%付近までは摩耗機構が変わらないことがわかっているので実用的には差し支えないと言える。トラック・バスについては摩擦係数0.70～1.10に相当するスリップ率は図7から荷重40 Nで見ると5～10%に相当する。図7で興味深いのは荷重が高くなるとスリップ率が0%でも摩擦力が生じていることである。これはサンプルが路面に接する時の踏み込み、蹴りだしによる変形により摩擦が生じるためであり、見かけの転がり抵抗を測定していることになる。ランボーンタイプの場合はドラムの曲率のため、この変形は平面对比大きくなり、荷重が高くなると顕著に現れる。厳密な転がり抵抗の測定はサンプルを自由回転させてその時の摩擦力を測定しなければならないが、ゴムサンプルの転がり抵抗がどこまで意味があるのかは良くわからない。

2.5 摩耗表面と摩耗粉

以上に述べた実験の完了したサンプルについて摩耗表面の観察を行ったところ、図8 (a) に示すようにどのサンプルも直径が10 μm ～20 μm の穴があいていてアプレージョンパターンはなく、P摩耗の典型的な形態を取っていることがわかった。図8 (b) は粘着テープで摩耗表面から摩耗粉を集めた結果で、摩耗粉も直径10～20 μm と当然ではあるが同じ大きさである。これはMorris¹⁶⁾、J. Panko¹⁷⁾の屋外で採取した摩耗粉の大きさと一致しており、

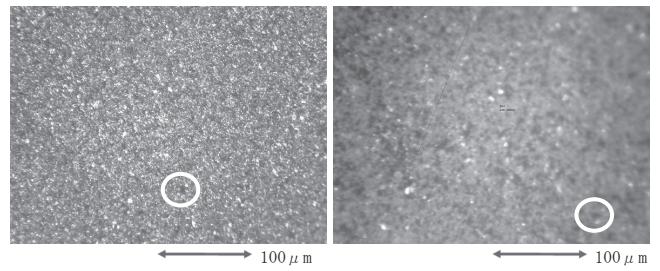


図8 (a) 摩耗表面 (円内が穴の例) (b) 摩耗粉 (円内が摩耗粉の例)

富樫ら⁵⁾のタイヤ表面観察結果とも一致しているので本検討結果はタイヤの摩耗とメカニズムが同じであることを示している。Pankoによると摩耗粉は凝集して周りのアスファルトの基材のかけらをも巻き込んでロールを形成しているが個々の摩耗粉の粒径はMorrisの観察結果と一致している。

4. まとめと今後の課題

本稿のまとめとしてタイヤの入力に合わせたゴムの摩耗試験条件の設定について検討した結果、乗用車とトラック・バスについて最適な設定は表3に示す条件であることがわかった。条件を決定する上で影響が大きいのは荷重とスリップ率であり、乗用車とトラック・バスでは条件を分ける必要があることもわかった。

今後、車両のコネクテッド (C)、自動運転化 (A)、シェアリング (S)、電動化 (E) が進むにつれ車両の使用条件はマイルドとなり、摩耗の過酷度は更に下がると予想され、これに伴いスリップ率の低い摩耗試験が主流となっていくと考えられる。車両の軽量化も進むと予想されるが、軽量化しても指定内圧を変更しない限り接地圧が変化しないので摩耗に対する影響は少ないであろう。また、これらの将来トレンドに応えるためには耐摩耗と同時に、燃費の指標である転がり抵抗の大幅改良も必要になると考えられ、トレッドの幅を狭くして高内圧にしたタイヤが出現する可能性が高い。この場合は耐摩耗性が低下する方向であるので更に耐摩耗性を改良する技術が必要になる。

タイヤのゴムリサイクルも重要な課題であり、タイヤを粉碎した粉ゴムを配合すると耐摩耗性が劣るので使用量には限界があったが、ある程度の過酷度以下になると耐摩耗の低下は少なくなり、普及が進むと期待される。ただ、摩耗粉のサイズが10～20 μm 程度なのでそれ相当の粉ゴム

表3 トレッドゴム摩耗試験の条件例

	乗用車	トラック・バス
荷重 (N)	10～15	40～50
サンプル速度 (m/min)	100～200	100～200
スリップ率 (%)	2.5～5%	5～10%
路面 (#)	240	240

を製造するとなるとエネルギーコストが嵩むので、低過酷度の摩耗条件で粉ゴムの粒径最適化に関する研究も必要となってくるであろう。

タイヤトレッドのゴム配合設計に当たっては如何にお互いに背反性能の関係にある摩耗、転がり抵抗、Wet制動力の関係を両立できるかが鍵である。一般に摩耗を改良すると転がり抵抗は悪化し、転がり抵抗を改善するとWet摩耗が低下、Wet摩耗を改良すると耐摩耗性が低下する。これをマジック・トライアングルと呼んでおり両立する技術の開発が配合設計のポイントとなる。噛合い式混練り機によるゴム練りの条件改良、シランカップリング剤による充填剤ミクロ分散の改良、溶液重合ポリマーの末端変性などが両立技術の例として良く知られている¹⁹⁾。いずれの場合も充填剤のネットワークを抑え、走行による充填剤の配向疲労を改善している。今後、これらの背反性能を更に克服できる新原材料の技術開発が切望される。

References

- 1) Lambourn, L. J. *Rubber Chem. & Technol.*, **1929**, 2, 166.
- 2) Schallamach, A. *Rubber Chem. & Technol.* **1968**, 41, 209.
- 3) Veith, A. *Rubber Chem. & Technol.* **1992**, 65, 624.
- 4) Grosch, K.A.; Schallamach A. *Wear*. **1961**, 4, 356.
- 5) 富樫実；毛利浩 *日本ゴム協会誌* **1996**, 66, 739.
- 6) 毛利浩 *材料科学*, **1997**, 34, 25.
- 7) Grosch, K.A. *Rubber Chem. & Technol.* **2008**, 81, 470.
- 8) Grosch, K.A. *Rubber Chem. & Technol.* **2004**, 77, 791.
- 9) ISO23233 Determination of resistance to abrasion using a driven, vertical abrasive disc.
- 10) https://www.ueshima-seisakusho.co.jp/product/product_gum/gum_kakou42.html (accessed June 12, 2021) .
- 11) ISO23337 Determination of abrasion resistance using Improved Lambourn test machine.
- 12) 自動車タイヤの基礎と実際, 山海堂, 2006.
- 13) 藤川達夫；山崎俊一 *自動車研究*, **1995**, 17, 548.
- 14) 山崎俊一；小池晃広；明間博 第13回エラストマー討論会, **2000**, A20.
- 15) 金子貴行；中村英夫 *JARI Research Journal*, **2019**, 20190601.
- 16) Morris, M. D.; Kossyrev, P.A. *Rubber Chem. & Technol.* **2018**, 91, 339.
- 17) Panko, J.; Kreider, M.L.; Britt, L.; McAtee, L. I. *Science of the Total Environment*, **2010**, 408, 652.
- 18) 堤文雄；榊原満彦；大嶋昇；藤巻達雄；濱田達郎 *日本ゴム協会誌* **1990**, 63, 243.

*

*

*

*

*

~~~~~出版物のご案内~~~~~

## ゴム用語辞典<第3版>

B 6判 340頁 (2013. 1. 発行)  
日本ゴム協会編  
発行 丸善出版(株)

定 価 5, 000円+税  
会員価格 4, 500円+税  
送 料 別途

### 基礎用語から現場用語まで網羅した技術者必携の書

ゴム産業全般およびゴム関連科学の用語を解説した辞典。日本ゴム協会による技術者必携に辞典を刊行後 15 年を経て全面改訂。掲載解説用語を全面的に見直し、既存用語も内容を大幅に改訂。ゴムにかかわる基礎用語から現場で使われる最新用語まで網羅し、注目されるソフトマテリアル関連用語も追加。五十音順、小項目用語辞典で、見出し語 4,000 語以上について、簡素に解説。

※お申込の場合は、必要事項（送付先住所、勤務先、氏名、電話）をご記入のうえ、下記あてお申し込みください。

一般社団法人日本ゴム協会 図書係あて  
E-mail: tosho@sri.j.or.jp