

路面の“きめ”と転がり抵抗の関係について

渡邊一弘* 井谷雅司** 久保和幸***

1. はじめに

2010年1月に(社)日本自動車タイヤ協会により転がり抵抗に関する性能も加味した**タイヤのラベリング制度***が開始されるなど、自動車走行の燃費に関する社会的関心は近年より一層高まってきている。しかし、舗装分野においては一部で舗装種別と燃費の関係に関する研究が進められているものの、その転がり抵抗の測定手法も規格化されておらず、自動車の燃費を考慮した路面設計はなされていない。

舗装においてタイヤの転がり抵抗に与える影響因子としては、縦断勾配、平坦性および路面のテクスチャが考えられる。世界道路協会(PIARC)では、路面の幾何学的形状と道路のサービス性能との関係を図-1のとおり整理している²⁾。タイヤの転がり抵抗に関しては、同図中の幾何学的形状のうち、路面波長が大きい坂(縦断勾配)や平坦性の与える影響が大きいとされているが、これらは道路本体の設計対象項目や舗装の施工性に左右されるものである。一方で、路面設計段階で考慮可能な指標である路面の“きめ”(図-1中のマクロテクスチャレベルに相当)も、転がり抵抗に影響を及ぼすとされているが、具体の報告事例はなくその関係は明確となっていない。

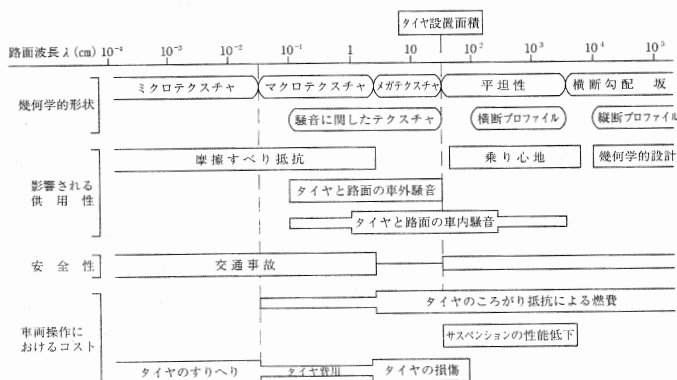


図-1 テクスチャの分類と道路のサービス性能との関係

2. 提案した路面の転がり抵抗の測定手法

自動車の燃費測定は、転がり抵抗も含めた走行抵抗を計測するものであるが、シャシダイナモ上(写真-1)やテストコースにおいて測定されている。また、**タイヤのラベリング制度**におけるタイヤの転がり抵抗の測定では、タイヤを測定機であるドラムに接地・回転させ、得られた測定値を換算し、転がり抵抗を求めることとされている(写真-2)。しかし、路面の観点から転がり抵抗を検討する際は、テストコースを全面打換えることは現実的でなく、またドラム状のものに各種の路面を貼り付けることも困難である。そこで、路面の種別に応じて転がり抵抗に差があるのかを調べるべく、以下の測定手法を提案した。



写真-1 シャシダイナモ試験



写真-2 タイヤドラム試験

① 平均牽引力測定法

自動車が一定走行速度で走行する場合、空気抵抗と転がり抵抗及び自動車の機構内部の損失(軸の回転・摩擦損失等)の合計と同等の力を駆動軸を介して路面に加え続けていると考えられる(図-2参照)。空気抵抗は車両の本体にかかることから、非駆動軸のみに着目すると、転がり抵抗力が測定できることとなる。そこで、前輪駆動の普通自動車の左後輪に車軸にかかる6方向の力(Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz)を計測できる測

A Study on the Relationship between Road Surface Texture and Rolling Resistance

*土木用語解説: タイヤのラベリング制度

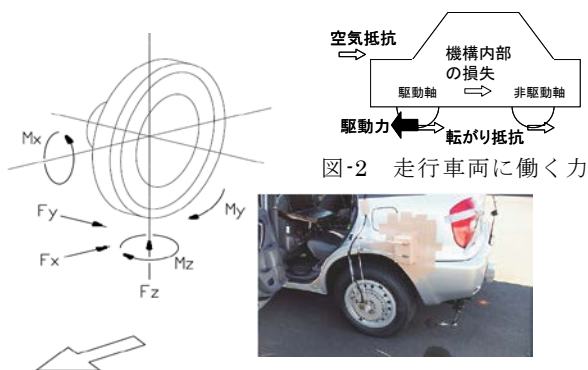


図-2 走行車両に働く力

図-3 測定器の計測方向との取付状況

測定器を取り付け（図-3）、一定速度となるように同一路面上を運転しながら対象路面を走行した時に当該輪にかかる抵抗力（ F_x ：転がり抵抗力）を測定することとした。当該力は、輪荷重となる鉛直方向の力（ F_z ）に比べて微小であること及び各種路面間の差も微小であると考えられることから、また実走速度のばらつきの影響を軽減するため、測定間隔（サンプリング間隔）を細かく刻んで0.01秒とし、指定速度（20, 40, 60km/h）毎に10回繰り返し測定を行うこととした。

② 惰性走行法

自動車が一一定速度で対象路面に進入し、当該路面を惰性走行する場合も、①と同様に空気抵抗と転がり抵抗及び自動車の機構内部の損失による抵抗力を受けながら、速度が低下していく。この時、車両と速度及び風速等の環境が一定である場合、路面を変化させると抵抗力の中で転がり抵抗によるもののみが変動することとなる。そこで、JIS化されている惰行試験方法³⁾を参考に、①で使用する自動車を対象路面に指定速度で進入し、同一路面上を一定の距離（80m）惰性走行を行った後の退出時の速度を計測し、進入・退出速度の変化率を求めることとした。なお、①と同様の理由から、指定進入速度（20, 40, 60km/h）毎に10回繰り返し測定を行うこととした。

③ 軸タイヤ自由転がり法

自動車を用いて抵抗力を測定する場合は、前述のとおり転がり抵抗力のみの測定が出来ない。一方で、自動車ではなく独立したタイヤに着目することにより、転がり抵抗に焦点をあてることが考えられる。そこで、タイヤ単体では自立が困難であるので、普通自動車のタイヤ2本を有する車軸（軸タイヤ）（写真-3）を作製し、一定の坂路（図-4）から対象路面に向けて転がし、同一の路面上を転がり始めてから停止するまでの距離を計測す



写真-3 軸タイヤ



図-4 軸タイヤ自由転がり法用の坂路

ることとした。なお、①、②による方法と比べてタイヤにかかる重量が軽く、また対象路面上を転がる速度も低速であることから、風の影響を除外するために対象路面を覆うテントを設置して測定することとし、また、本方法でも10回繰り返し測定を行うこととした。なお、自動車に装着されたタイヤの状態と比較すると、この軸タイヤはその自重のみしか鉛直方向の力が加わっておらず、タイヤの設置圧、設置形状に大きな差異があることに留意が必要である。

3. 測定対象路面

路面のきめに着目した転がり抵抗の測定を行うためには、対象とする路面はきめ以外の条件を可能な限り同一にする必要がある。土木研究所の舗装路面騒音研究施設は、排水性舗装A（最大粒径13mm）、排水性舗装B（最大粒径5mm）、多孔質弾性舗装及び密粒度舗装（最大粒径13mm）の4種類の舗装路面（各路面幅3m×延長80m）を有し（写真-4）、タイヤと路面から発生する音を正確に測定することを目的とした施設であり、縦横断勾配もほとんどなく平坦性も高い。また、路面の性状を一定に保つため、通常はテントにより路面を保護している。そのため、転がり抵抗の測定にあたり、舗装の剛性は別としても路面のきめ以外の条件がほぼ同一であることから、本施設を対象路面とし、これら4種類の路面間の転がり抵抗の測定を行うこととした。

なお、対象路面のきめは、舗装調査・試験法便



写真-4 施設の路面状況

図-5 MPDの定義

覧S022-3Tに準拠し、CTメータを用いて各路面の外側車輪通過部上の2点及び内側車輪通過部上の1点の平均プロファイル深さ(MPD:Mean Profile Depth)[mm] (図-5)を測定することとした。単位長は100[mm]である。MPDの値が小さいほど、きめの細かい平滑な路面となる。

4. 測定結果

測定結果を表-1に示す。また、同一指標で転がり抵抗を比較するために、①～③の測定方法による結果より、転がり抵抗係数を以下の方法で算出した結果を表-2に、路面のきめと転がり抵抗の関係を図-6に示す。なお、これらの結果は2.で述べたとおり、転がり抵抗以外の空気抵抗力等を含むものや、軸重の違いの影響を含むものである。よって、結果の絶対値ではなく測定路面間の傾向に着目する必要がある。

<転がり抵抗係数 μr の算出方法>

① 平均牽引力測定法

転がり抵抗を鉛直方向の力で除算して算出する。

$$\mu r = Rr / W$$

Rr : 転がり抵抗 (=牽引力 F_x) の平均[N]

W : 鉛直方向力 F_z の平均[N]

② 惰性走行法

進入速度20、40、60km/hと変えた場合の測定区間80mを通過するまでの所要時間と減速度より、走行抵抗を算出し、各進入速度の結果から最小二乗法により空気抵抗及び転がり抵抗に分け、転がり抵抗を試験時車両重量で除算して転がり抵抗係数を求める^{3),4),5)}。

③ 軸タイヤ自由転がり法

運動エネルギーの法則から初速を求め、停止までの転がり距離を元に転がり抵抗係数を算出する。この場合、2.で述べたとおりタイヤにかかる鉛直方向の力が大きく異なり、タイヤの設置形状が異なることに留意が必要である。回転エネルギー、坂路走行及び空気抵抗によるエネルギーロス各路面種別で差が微小なものと考えて無視して算出している。

$$\mu r = h / L$$

h : 転がり始める高さ[m]

L : 停止までの距離[m]

図-6より、いずれの測定方法においても路面種別間の転がり抵抗係数が同様の傾向を示していることから、路面の種別により転がり抵抗に差があることが示唆された。本試験条件下(気温6～18℃、路面温度12～25℃、タイヤ空気圧200kPa)では、多孔質弾性舗装と排水性舗装Aはほぼ同等、また、排水性舗装Bと密粒度舗装はほぼ同等で、前者の2種類の方が転がり抵抗が大きい。また、同一舗装種別で舗装の剛性等の条件がほぼ同等と考えられる排水性舗装AとBでは路面のきめの違いが支配的な差であると考えられることから、この転がり抵抗の差は路面のきめの影響であると考えられる。

表-1 路面のきめ(平均プロファイル深さ:MPD)と転がり抵抗各測定方法の測定結果一覧

	排水性舗装A 最大粒径13mm	排水性舗装B 最大粒径5mm	多孔質弾性舗装	密粒度舗装 最大粒径13mm
平均プロファイル深さ(MPD) [mm] (OWP上2点、IWP上1点の平均)	1.31	0.70	0.87	0.34
①平均牽引力測定法による 転がり抵抗の平均 [kM]	V=60km/h	0.052	0.050	0.055
	V=40km/h	0.063	0.061	0.066
	V=20km/h	0.074	0.071	0.076
②惰性走行法による 速度の変化率 [%]	初速V=60km/h	8.0	8.6	8.9
	初速V=40km/h	14.9	14.3	15.2
	初速V=20km/h	50.6	43.3	49.9
③軸タイヤ自由転がり法 による停止までの距離 [m]	58.6	68.6	53.9	61.9

表-2 各路面の転がり抵抗係数

	排水性舗装A 最大粒径13mm	排水性舗装B 最大粒径5mm	多孔質弾性舗装	密粒度舗装 最大粒径13mm
①平均牽引力測定法による 転がり抵抗係数	0.0191	0.0184	0.0199	0.0183
②惰性走行法による 転がり抵抗係数	0.0143	0.0125	0.0139	0.0129
③軸タイヤ自由転がり法 による転がり抵抗係数	0.0107	0.0091	0.0116	0.0101

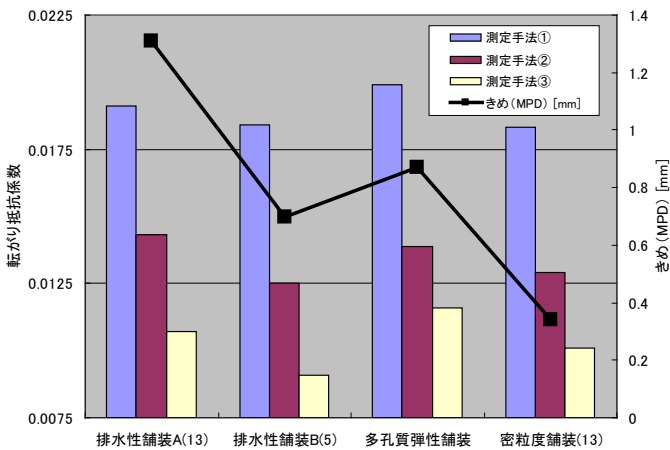


図-6 路面のきめと転がり抵抗係数の関係

5. 実道での試験方法の提案

本実験で提案した三種類の測定方法について、実道での適用性を比較検討したものを表-3に示す。惰性走行法では転がり抵抗以外の抵抗力も総合的に測定していること、軸タイヤ自由転がり法は車軸にかかる鉛直方向の力が再現されていないこと、またそれら二つの測定方法は実道の縦断勾配の影響が支配的になることが考えられる。一方、平均

表-3 測定方法間の実道適用性に向けた比較

測定方法	①平均牽引力測定法	②惰性走行法	③軸タイヤ自由転がり法
測定の容易さ	x (費用, 機器設定, 運転熟練度)	Δ (運転熟練度)	○
他の影響要因	○	Δ (空気抵抗, 内部抵抗)	x (無軸重(タイヤ変形の差異), 低速による風影響)
実道適用性	○	Δ (勾配等の影響)	x (勾配等の影響, 要交通規制)
総合評価	○	Δ	x

牽引力測定法は、計測機器が高価であることや一定走行するというある程度の運転熟練度が求められるが、縦断勾配の影響が小さいことや交通規制が不要であることから、実道での適用性の面で有利であるといえる。

6. まとめ

本研究では、同一条件下で異なる舗装種別における普通自動車の転がり抵抗の測定を試みた。その結果、舗装の種別により転がり抵抗に差があること、同一舗装種別では路面のきめが転がり抵抗に影響を及ぼし得ることを明らかにした。また、その測定方法に関しては、実道での適用性の面から平均牽引力測定法が適していると考えられた。

転がり抵抗はもとより、自動車の燃費向上やCO₂排出量削減を考慮するには、縦断勾配を考慮した道路設計や平坦性の良い舗装の施工を行う必要があると考えられる。舗装の路面設計を行う際に転がり抵抗を考慮する場合は、これらを総合的に勘案する必要がある。また、タイヤの差異、気温・路面温度の差異や湿潤路面での検討、舗装の剛性の影響が大きくなると考えられる大型自動車を対象とした検討など、様々の条件下での知見の蓄積をはかっていくこととしている。

参考文献

- 1) 吉本：コンクリート舗装と重量車の転がり抵抗・燃費、コンクリート工学、Vol.48、No.4、pp.10～17、2010.4
- 2) 建設図書：PIARCによるテクスチャの分類と道路のサービス性能との関係、舗装の質疑応答、Vol.9、2005.7
- 3) 日本規格協会：JIS D 1015自動車—惰行試験方法、1993
- 4) 日本規格協会：JIS D 1012自動車—燃料消費率試験方法、2005
- 5) 山海堂：自動車の走行性能と試験法、2002.3

渡邊一弘*



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所道路技術研究グループ
舗装チーム 主任研究員
Kazuhiro WATANABE

井谷雅司**



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所道路技術研究グループ
舗装チーム 研究員
Masashi ITANI

久保和幸***



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所道路技術研究グループ
舗装チーム 上席研究員
Kazuyuki KUBO