タイヤ摩耗寿命の評価手法に関する一検討*

酒井 智次^{*1}, 中村 秀之^{*2}
小早川 晋治^{*2}, 大橋 義之^{*2}

A Study on the Tire Wear Life Test Method

Tomotsugu SAKAI, Hideyuki NAKAMURA,
Shinji KOBAYAKAWA and Yoshiyuki OHASHI

The authors analysed the causes that the tire wear lives estimated by the current test method are not always correct, and found that the correct lives are given only under the premise that the wear rate ratio of tested tires is always constant under any condition. With regard to the tire tread rubber compounds, the Lambourn-type wear tests were carried out. These tests have made it clear that the wear rate ratio of one tread rubber compound to another compound changes as the slip ratio, the normal load or the surface roughness of the grindstone changes; namely the above-mentioned assumption does not always come into existence. In these cases, wear tests must be carried out under the equivalent conditions to the real world. The test conditions of Lambourn-type wear test were investigated in order to reproduce the wear mode of the tires collected from the field. The grindstone of #240 or more smooth and the slip ratio of 2% or so are predicted to be desirable, but further investigations are needed to find the optimum conditions.

Key Words: Tire, Wear, Life Estimation Method, Wear Mode, Lambourn-type Test, Test Condition

1. 背景

同一車両に, A, B, C, 3種類のタイヤを装着して, 山間路を主体とした走行路aのみと高速道路を主体とした走行路bのみをそれぞれ走行させてA, B, Cの単位走行距離当たりの摩耗量(摩耗率 M mm/km)をコースaとコースbとについて求めたところ, 3者間の摩耗率の比がコースaとコースbとで, 表1に示すように, 大幅に異なる事例が現れた。

この事実は, 特定試験条件下での比較試験を主体とする現状タイヤ摩耗寿命評価に混乱を与える。

そこで, 現状タイヤ摩耗寿命評価手法のどこにこの原因があるかを検討する。合わせて, どのようにすれば妥当な摩耗寿命が得られるかを検討し, 一つの解決策として市場の摩耗モードを再現させる試験条件を簡単な試験片試験が容易で主としてタイヤの摩耗試験に用いられているランボーン摩耗試験⁽¹⁾で検討する。

2. タイヤ摩耗寿命評価手法の現状

同一型式車両に, 摩耗寿命を評価したい供試タイヤ

Aと既に市場寿命がわかっている基準タイヤBとを装着して, 特定の走行コースを両者同じように走らせて, 供試タイヤAと基準タイヤBとの摩耗率 M_A, M_B を求める。 h を有効溝深さとして, 摩耗寿命 $L_A = h_A / M_A, L_B = h_B / M_B$ の比 L_A / L_B から供試タイヤの摩耗寿命を推定する方法が一般的である。

また, トレッドゴムの種類だけをB'からA'に変える場合には, 円板状のゴム試験片を用いたランボーン摩耗試験で, 定められた条件のもとで両者の摩耗率 $M_{A'}, M_{B'}$ [cc/min] を求め, その比 $M_{A'} / M_{B'}$ から摩耗寿命を推定することも試みられている。

これらの方法は, 市場寿命のわかったタイヤまたはゴム種を基準とした比較評価であり, 一見確実な方法と考えられがちである。

Table 1 Wear rate ratios of tire B and C to A

Road	Compared tire		B/A	C/A
	Wheel	axis		
Winding, up-and-down road (course a)	Front		1.57	1.97
	Rear		1.66	1.98
Straight, flat road (course b)	Front		2.92	3.14
	Rear		2.21	2.56

Rear drive car, test period : 2.5 months in winter

* 原稿受付 1995年10月2日。

^{*1} 正員, トヨタ自動車(株) (〒471 豊田市トヨタ町1)。

^{*2} トヨタ自動車(株)。

3. タイヤ摩耗影響因子と 現状評価方法の前提条件

タイヤ摩耗に影響する因子の分類の一例を図1に示す。

これらの影響因子が変化した場合でも、現状評価手法たる比較評価が精度よく成立するための条件を検討する。

比較評価が精度よく成立するという事は、タイヤ摩耗寿命の比が種々の条件が変化しても常に同じ値を示し、条件の変動によって変化しないことである。ここで、一例として、タイヤに作用する前後・左右等の荷重分布がa分布とb分布をとる場合について、AタイヤとBタイヤの寿命比が同じとなるための条件を求める。

荷重 F とタイヤ摩耗寿命 N との関係を図2に、荷重 F とその発生頻度 n との関係を図3にそれぞれ示す。一定荷重 F_i 時の摩耗寿命を L_i とすれば、

$$L_i = cN_i = h/M_i \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、

c : タイヤ周長 [km/回]

N_i : 寿命までの回転数 [回]

h : 有効溝深さ [mm]

M_i : 1 km 走行当たりの摩耗量 [mm/km]

摩耗現象が摩耗率一定で進行し、摩耗量が繰返し回数に比例すると仮定すると、直線累積被害則の考え方から次式が導かれる。

荷重頻度分布 $a(n_{ai}[\text{回/km}])$ の場合

$$\text{タイヤ A の寿命 } L_A = 1 / \left(\sum \frac{n_{ai}}{N_{Ai}} \right) \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{タイヤ B の寿命 } L_B = 1 / \left(\sum \frac{n_{bi}}{N_{Bi}} \right) \quad \dots\dots\dots(3)$$

タイヤ A と B との寿命比は、式(1)~(3)から次式となる。

$$\left\{ \frac{L_A}{L_B} \right\}_{n_a} = \left(\sum \frac{n_{ai}}{N_{Bi}} \right) / \left(\sum \frac{n_{ai}}{N_{Ai}} \right) \\ = \frac{C_{B'} \sum n_{ai} M_{Bi}}{C_{A'} \sum n_{ai} M_{Ai}} \quad \dots\dots\dots(4)$$

荷重頻度分布 $b(n_{bi}[\text{回/km}])$ の場合も同様にしてタ

イヤ A と B との寿命比は次式となる。

$$\left\{ \frac{L_A}{L_B} \right\}_{n_b} = \left(\sum \frac{n_{bi}}{N_{Bi}} \right) / \left(\sum \frac{n_{bi}}{N_{Ai}} \right) \\ = \frac{C_{B'} \sum n_{bi} M_{Bi}}{C_{A'} \sum n_{bi} M_{Ai}} \quad \dots\dots\dots(5)$$

荷重頻度分布が異なっても寿命比が同じになるためには式(4)、(5)を等しいと置いて、次式が得られる。

$$(\sum n_{ai} M_{Bi})(\sum n_{bi} M_{Ai}) = (\sum n_{bi} M_{Bi})(\sum n_{ai} M_{Ai}) \\ \dots\dots\dots(6)$$

荷重頻度分布がどのように異なっていようと (n_{ai}, n_{bi}) が任意の値であっても式(6)が成立するためには、 $n_{ai} \cdot n_{bj} (i \neq j)$ の係数が右辺と左辺ですべて等しくなければならない。すなわち、式(7)が成立しなければならない。

$$M_{Ai} \cdot M_{Bj} = M_{Aj} \cdot M_{Bi} \\ \therefore M_{Ai}/M_{Bi} = M_{Aj}/M_{Bj} \quad \dots\dots\dots(7)$$

式(7)は、任意の荷重レベル i, j における、タイヤ A, B の摩耗率の比が常に同じ値にならねばならないことを表している。

以上は摩耗影響因子として荷重を取り上げた場合であるが、図2,3の縦軸を温度や路面粗さに置き換えても同じことが言える。

すなわち、現状のタイヤ摩耗寿命評価手法は、荷重の大きさ、路面粗さ、温度などの各種試験条件が異なった場合にはそれら条件が摩耗率に及ぼす影響が常に一定 (M_A/M_B が常に一定) である、という仮定を前提にしている。

この前提条件がどの程度の精度で成立しているかが、本方法の精度を左右する。

4. 現状評価方法の前提条件の検証

タイヤ構造、タイヤ形状、トレッドゴム種のうち、試験片試験が容易なトレッドゴム種を変えた場合について、上記の前提条件の検証を行う。

4.1 試験方法 ゴム試験片を用いて手軽に実施可能で、主にタイヤ用の摩耗試験として採用されているランボーン摩耗試験で検証する。試験装置の概略

Fig.1 Factors affecting the tire wear

Fig.2 F-N relationship

Fig.3 F-n relationship

を、図4に示す。

試験片は、直径 50 mm、厚さ 10 mm の円板である。試験条件を、表2に示す。試験時間は、摩耗量の測定精度を保つために、0.1 g 以上摩耗する時間だけとはするようにした。

4・2 供試ゴム種 通称，“高性能ゴム”といわれる中から種類 H を，“低燃費ゴム”といわれる中から種類 L を選んで供試ゴム種とした。

4・3 試験結果 表2に示す3条件(砥石粗さ2レベル、押付け力2レベル、スリップ率4レベル)の組合せ16ケースに対する試験結果を表3に示す。左欄には摩耗率 $M(10^{-3} \text{ cc/min})$ を、右欄に摩耗表面の中心線平均粗さ $R_a[\mu\text{m}]$ を、それぞれ示す。

ここに、摩耗表面の粗さとして中心線平均粗さ R_a を記したが、最大高さ R_{max} ・十点平均粗さ R_z も同時に測定して3者の関係を調査し、各2者間には明確な直線関係がある(相関係数も0.94以上)ことを確認済みである。

4・4 考察 ゴム種 H と L の摩耗率の比 M_H/M_L を求めて図5に示す。摩耗率の比 $\alpha = M_H/M_L$ は、0.74 から 1.18 まではばらついており、一定値にはなっていない。スリップ率が変われば α も変化し、砥石粗さが変わっても α が変化し、押付け力によっても α が変化するようである。

すなわち、摩耗条件が変わればゴム種類間の摩耗率

比 α も変化⁽²⁾ し、先程述べた現状評価方法の前提条件たる「各種の試験条件が異なっても、摩耗率比が常に一定となる」という仮定は必ずしも成立しない場合があることが判明した。条件によってゴム間の摩耗率比が変化し、場合によっては逆転もありうる。

以上より、背景で述べたような走行コースによって摩耗率比が異なる可能性が証明された。この場合走行コースによって、荷重(前後・左右の加速度)頻度分布にかなりの差があり、荷重の影響がタイヤによってかなり異なるものと推定される。

Fig. 4 Lambourn-type wear testing machine

Table 2 Test conditions of lambourn-type wear test

Grindstone	Diameter : 180 mm Abrasive grain material : Carborundum Bond : H Grain size: #80 , #220
Dusting powder	Carborundum (#80, #220) : 20g / min
Normal load F	15N, 30N
Slip ratio s	6%, 12%, 24%, 50%

Here, $s = (V_s - V_0) / V_s$, $V_s > V_0$
 V_s : surface speed of rubber sample = 75 m/min
 V_0 : surface speed of grindstone

Fig. 5 Graphs of the wear rate ratio of rubber H to rubber L

Table 3 Test result tested by lambourn-type wear test

Rubber	Item abradant	Wear rate $M(10^{-3} \text{ cc/min})$								Surface roughness $R_a(\mu\text{m})$							
		#80				#220				#80				#220			
		6	12	24	50	6	12	24	50	6	12	24	50	6	12	24	50
H	15	----	1.68	12.2	34.9	----	3.25	9.12	14.0	----	4.95	6.24	5.79	----	2.16	2.39	2.51
	30	----	2.61	30.1	61.6	0.87	5.63	18.7	38.1	----	5.06	8.80	6.64	3.63	2.49	3.29	3.06
L	15	0.26	1.89	11.8	32.2	----	2.80	7.84	13.4	2.52	4.89	5.85	5.30	----	2.14	2.00	1.86
	30	0.40	3.52	27.4	53.4	1.01	5.71	17.8	32.4	3.07	6.39	6.73	7.16	2.24	2.17	2.74	2.46

F : Normal load (N), s : Slip ratio (%)

Table 4 Wear rate M and surface roughness R_a of worn tire treads tested on various roads

Roads Rubber	Wear rate M (nm / cycle)			Surface roughness R_a (μm)		
	Real world	Limited public road	Proving ground	Real world	Limited public road	Proving ground
H	----	----	2.0	1.87, 1.49, 1.29, 1.71, 1.24, 1.89, 1.53	----	4.41
N	0.15 , 0.16	0.31 , 0.13	----	1.37, 1.21, 1.43, 1.22	1.79 , 1.63	----
L	----	0.33 , 0.15	----	----	1.93 , 1.32	----

5. 現状評価方法で考慮すべきこと

したがって、もし一般市場と異なった条件下で摩耗試験を実施した場合には、その異なった条件とすることで摩耗率が市場条件に比べてどう変化しているかを明確にして、その差を補正する必要がある。例えば、試験時間を短縮するために、前後・左右の作用加速度を大きくしたいいわゆる加速試験を行った場合には、供試タイヤ A と基準タイヤ B について加速試験条件下と市場条件下での摩耗率比 α_A, α_B を求めて、摩耗寿命比 L_A/L_B に α_A/α_B を乗じて補正しなければならない。すなわち、以下ようになる。

	加速試験 寿命	市場寿命	加速試験 摩耗率	市場条件 摩耗率
タイヤ A	L_{atA}	L_{fA}	M_{atA}	M_{fA}
タイヤ B	L_{atB}	L_{fB}	M_{atB}	M_{fB}

市場寿命比を $l_f = L_{fA}/L_{fB}$ 、加速試験寿命比を $l_{at} = L_{atA}/L_{atB}$ とし、タイヤ A、タイヤ B に対する加速試験時と市場条件時の摩耗率比を

$$\alpha_A = M_{atA}/M_{fA}, \quad \alpha_B = M_{atB}/M_{fB} \dots\dots\dots (8)$$

と置くと、

$$\begin{aligned}
 l_f &= \frac{L_{fA}}{L_{fB}} = \frac{h_A/M_{fA}}{h_B/M_{fB}} = \frac{h_A \alpha_A M_{atA}}{h_B \alpha_B M_{atB}} \\
 &= \frac{\alpha_A L_{atA}}{\alpha_B L_{atB}} = \frac{\alpha_A}{\alpha_B} l_{at} \\
 \therefore l_f &= \frac{\alpha_A}{\alpha_B} l_{at} \dots\dots\dots (9)
 \end{aligned}$$

もし、前記の前提条件 (M_A/M_B が常に一定) が成立する場合には、 $\alpha_A/\alpha_B = 1$ となり、補正前後で同じ値となる。

図 1 に示したストレス的因子(負荷の大小、路面粗さ、温度の高低など)が試験条件下と一般市場とでどうなっているかを明らかにし、それぞれの差が供試タイヤと基準タイヤの摩耗率に及ぼす影響度合いを明らかにして、その差が大きい場合には補正を加えなければならない。

以上述べたように、各因子の影響度合いを供試タイヤごとに調べて補正する方法がある。しかし、これは

膨大な試験となる。これに対して、各因子の影響度合いを供試タイヤごとに調べる試験をせずに済む方法がある。それは、改めて言うまでもなく、試験条件を一般市場と同等にすることである。

6. 一般市場での摩耗モードを再現する試験条件

6.1 実車による一般市場での走行試験 交通の流れにのって、市街路・郊外路・山間路・高速道路などを使用者の平均的な割合で走行すれば、ほぼ平均的な市場条件を再現していよう。ただし、短期間で試験を終わる場合には、試験期間中の温度の影響の補正が必要である。また、前後・左右加速度が交通の流れより常に大きくなるような走行(加速試験)を繰返す場合には、負荷の影響の補正が要る。

一般市場の道路でない、特定のテストコースなどを走る場合には、路面粗さの影響の補正も必要となる⁽³⁾。

温度・負荷・路面粗さなどの影響は実車試験でも求められなくはないが、台上試験で求めるほうが实际的であろう。そのためには、調査する影響因子以外は市場条件と同等にしなければならず、台上試験で市場での摩耗モードを再現する必要がある。

6.2 台上試験 前述のランボーン摩耗試験にて市場摩耗モードの再現を試みる。

ここに、市場摩耗モードの再現度を表す尺度として二つを考える。一つは、いわゆる摩耗モードを表す尺度として摩耗表面の中心線平均粗さ $R_a[\mu\text{m}]$ を、他の一つは摩耗率 $M[\text{nm/cycle}]$ をとりあげる。

一般市場走行タイヤ(回収品)、特定一般道を走行したタイヤ、社内試験コース走行タイヤについて、摩耗表面粗さ R_a と摩耗率 M を測定した結果を表 4 に示す。ここに、ゴム種 N は汎用ゴムの一種である。

(1) 摩耗表面粗さについて

表 3、表 4 から摩耗面の表面粗さを打点して、図 6 に示す。

摩耗表面粗さに対しては、砥石粗さが支配的で、スリップ率と押付け力の影響は検討した範囲内では小さ

Table 5 Surface roughness R_a of aggregates

Aggregate	R_a (μm)
Basalt	12.5
Diabase	8.1
Diorite	10.9
Sandstone	9.9
Pea Gravel	3.0

Fig. 6 Surface roughness of worn tire treads tested on various roads and worn rubber specimens tested by lambourn testing machine

い。

JISに規定されている#80の砥石では、摩耗表面が粗く⁽⁴⁾、摩耗モードが再現されているとはいいがたい。砥石#220の試験結果は、市場回収品や特定一般道走行品の表面粗さに近くなっているが、まだ若干粗い。砥石としては、#240以上の滑らかさが必要と思われる。

ゴムの摩耗は、路面の凹凸には左右されず、0.1 mm オーダ未満の微視的凹凸(粗さ)に大きく影響されるといわれている^{(5)~(7)}。路面舗装用のアスファルト骨材の表面粗さ R_a を測定した結果、玄武岩：12.5 μm から輝緑岩：8.1 μm までの結果が得られた(表5参照)⁽⁸⁾。一方、#220 砥石の表面粗さは $R_a=12\sim15\mu\text{m}$ となった。舗装用骨材の微視的凹凸によって市場回収タイヤの摩耗面が形成されているとすれば、#220 砥石より少し滑らかな砥石で市場の摩耗面が再現できそうだとする先述の結果とよく一致している。

(2) 摩耗率について

表3、表4から、摩耗率を打点して図7に示す。

摩耗率は、スリップ率と押付け力が大きくなると増大し、両者に大きく左右される。砥石が滑らかになると、スリップ率の影響が減少するようである。

市場での摩耗率を再現するには、図7で外挿すると、#220の場合2%前後と予測される。これは文献(9)の値、1.5%以下に近いスリップ率となっている。仮にこの条件が妥当だとしても、スリップ率2%前後で

Fig. 7 Wear rate of worn tire treads tested on various roads and worn rubber specimens tested by lambourn testing machine

の摩耗試験は、摩耗量測定精度を確保するために、ある摩耗量は摩耗させねばならず、非常に時間がかかり、実用的とはいいがたい。

実用上は、摩耗率の絶対値が市場での値と合っていないくとも、摩耗メカニズムが市場と同じで、かつ、ゴム種類間の相対値が市場条件でのそれと合っていれば試験結果を利用できるので、今後は、少なくとも妥当な相対値が得られる試験条件の探究が必要である。

7. 結 論

(1) 特定の条件下の比較試験で求めた摩耗率の比から一般市場の寿命の比を精度よく推定できるためには、両者の摩耗率の比が荷重や温度、路面等が変化しても常に一定でなければならないことを明らかにした。

(2) ランボーン摩耗試験で、砥石粗さ、押付け力、スリップ率を変化させると、ゴム種間の摩耗率の比が変化した。すなわち、(1)で述べた前提条件が必ずしも成立しないことを確認した。

(3) したがって、市場条件と試験条件とが異なる場合には、たとえ基準タイヤを用いた比較試験においても、その異なる条件が及ぼす影響度合いをタイヤごとに調査し、補正する必要がある。

(4) タイヤ摩耗評価用として採用されるランボーン摩耗試験で、摩耗表面粗さを市場回収品と合わせるためには砥石として#240以上の滑らかな砥石を使う必要がある。摩耗率を合わせるためには、外挿から2%前後のスリップ率がよいと予測されるが、これについてはさらなる検討が必要である。

最後に、本検討を進めるに当たって全面的なご協力をいただいた東洋ゴム工業(株)に心から感謝する。

文 献

- (1) JIS K 6264-1993, 7項。

- (2) 三橋健八, 第 39 回ゴム技術シンポジウム「ゴムのトライボロジー特性評価と実際」, (1995-3), 27-40, 日本ゴム協会研究部会.
 - (3) Kohmura, S. and Nakamura, H., ほか 2 名, *SAE Paper*, 910168 (1991-2).
 - (4) 山崎俊一・増田晃弘・兎沢幸雄・藤川達夫, 自動車研究, **17-1** (1995-1), 11-14.
 - (5) Lowne, R. W., *Rubber Chemistry and Technology*, **44** (1971), 1159-1172.
 - (6) Bond, R., Lees, G. and Williams, A. R., *THE PHYSICS OF TIRE TRACTION THEORY AND EXPERIMENT*, (1974), 339-360, Plenum Press.
 - (7) Veith, A. G., The Tire Pavement Interface, *ASTM STP*, 929 (1986), 125-158.
 - (8) 日本舗道(株), 社内資料.
 - (9) Ouyang, G. B., Shieh, C. H. and Funt, J. M., Carbon Black Effects on Treadwear, *Meeting of the Rubber Division*, (1990-5), Paper No. 76, American Chemical Society.
-