平山 道夫^{1,2*} 西野 孝²

Scaling of Wear Resistance of Rubber Compounds for Tires Using Rubber Properties

Michio HIRAYAMA^{1,2*}, Takashi NISHINO²(¹Sumitomo Rubber Industries, LTD., Tsutsui, Chuo, Kobe 651-0071, Japan.
²Department of Chemical Science and Engineering, Graduate School of Engineering, Kobe University, Rokko, Nada, Kobe 657-8501, Japan)*m-hirayama.az@srigroup.co.jp

The tire wear tests were performed for rubber compounds with different physical properties on the different road surface temperature using the same vehicle. It is clear that the temperature dependence of wear resistance were different for the different rubber compounds. The wear resistance W is found to be scaled using the fracture energy F (MJ/m³) and the storage modulus E^* (MPa) for the rubber compound as follows:

$$W = c(F^a / E^{*b}) \quad (a, b, c = \text{the constant number})$$

Temperature dependence of wear resistance is considered to be caused by the different contribution of F and E^* values.

(Received on September 21, 2012)

(Accepted on December 10, 2012)

Key Words : Wear resistance, Tire, Rubber compound, Scaling

1. 緒 言

耐摩耗性能はタイヤの重要な基本性能のひとつであり、制動性能、低燃費性能とのバランスが求められている中、省資源化および経済性の観点からタイヤの耐摩耗性能を確保することは重要である。この際、耐摩耗性能に影響する因子は多岐にわたっており、摩耗現象そのものが複雑であるために予測には困難を伴う¹⁻⁴⁾。

Figure 1には、耐摩耗性能に影響する主要な要因を挙げた。これらの影響のうち、特に温度についてはコンパウンドの種類により受ける影響の程度が異なる。摩耗の温度依存性はゴムのいずれの特性と相関があるのかについては不

Figure 1 Factors effect on tire wear resistance.

明な点が多い。Kienle⁵⁾らはマクロおよびミクロ構造を異にする12種類のポリマーを用いたガラス転移温度（以下Tgと略す）を異にする配合について、実車摩耗テストを行い、Tgと耐摩耗性能との間に高い相関を示すことを明らかにした。この際、夏と冬で耐摩耗性能が異なるデータを得ているが、その理由についての言及がなく、耐摩耗性能のメカニズムは必ずしも明らかになっていない。Veith⁶⁾らは10種類の異なる配合について、実車摩耗テストを実施し、E摩耗とP摩耗という2通りの摩耗機構の存在を提唱した。E摩耗およびP摩耗の変形挙動を模式的にFigure 2に示した。E摩耗はゴムが突起に粘着して弾性変形し、限界の摩擦力に達すると滑るという変形挙動である。ここで弾性を意味する“Elastic”の頭文字をとってE摩耗と名

Figure 2-a) E-wear

Figure 2-b) P-wear

Figure 2 Schematic diagrams of a) 'E-wear' and b) 'P-wear' proposed by Veith⁶⁾.

づけられている。E摩耗は過酷度の高い場合の摩耗であり、ゴムが大きく変形する場合、すなわち高温で生じるとされている。これに対してP摩耗は突起に沿ってゴムが滑る様相を表し、このときゴムは変形せずに引掻かれて破壊に至る挙動である。この場合、ゴムは硬くプラスチックのように挙動することから“Plastic”の頭文字をとってP摩耗と呼ばれている。P摩耗は過酷度の低い時の摩耗であり、低温時の変化に対応する。しかしながら、Veithらもこれらの摩耗現象についてゴムの物性を用いた定量的な解析を進めておらず、耐摩耗性能と物性の関連性については検討の余地がある。

今回われわれは、トレッドゴムの種類を異にするタイヤを用いて路面温度が異なる時期に実車摩耗評価を行い、耐摩耗性能の温度依存性について検討を行った。また、各種ゴム物性と耐摩耗性能の関連性について検討した。

2. 実験方法

2.1 試料

Table 1に本実験で用いたタイヤのトレッドゴムの配合を示した。ゴム成分として天然ゴム（NR）に対してTgを異にするスチレンブタジエンゴム（SBR）、ポリブタジエンゴム（BR）を配合し、これらの配合に加硫促進剤と硫黄等をそれぞれ配合した。

2.2 試料作製

加硫剤以外のゴム成分、補強剤としてのカーボンブラック、シリカ、加工助剤などをミキサー（株KOBELCO製 MIXTRON BB）に投入した。ミキサーの回転数は115 rpmで、検出トルクが一定になるまで混練した。多くの場合、排出温度は160℃で、混練時間は5分であった。ミキサーで混練したベースゴムに、オープンロール（関西ロール（株）製8インチロール）にて、ゴム温度が110℃以下にて、硫黄および加硫促進剤を4分間混練した。

得られた未加硫ゴムシートを用いて、厚さ10 mmのトレッドの形状に成形し、他のタイヤ部位と貼り合わせ、

170℃で12分間加硫することにより、試験用タイヤ（タイヤサイズ：195/65R15）を作製した。

各種物性の測定に供するサンプルとして、上記未加硫ゴムシートを用いて170℃、12分間加硫することにより平板状の加硫シート（厚さ2mm）を作製した。

2.3 測定

2.3.1 実車摩耗試験

同一車両を使用し、トレッドゴムを異にする4種類（配合A～D）のタイヤを用い、気温が異なる時期に実車摩耗試験を実施した。実車摩耗試験の時期として、7月（平均気温21℃、平均路面温度27℃）と11月（平均気温7℃、平均路面温度7℃）に実施した。試験方法として、高速道路、一般道路、山岳路を織り交ぜ、8000km走行させた後のタイヤ主溝の残溝を測定することにより摩耗量とした。ここで耐摩耗係数としてタイヤを1mm摩耗させるのに必要な走行距離（km）と定義した。

2.3.2 粘弾性試験

（株）岩本製作所製粘弾性スペクトロメーター（TYPE VES-F-Ⅲ）を用いて測定を実施した。試験片の寸法は、幅4 mm、厚さ2 mm、長さ40 mmである。試験片を保持するチャック間距離は30 mmとした。静的な初期伸張を10 %与えた状態で、0.5 %の動的歪を周波数10 Hzで与え、昇温速度3℃/分にて、-70～50℃の範囲内で貯蔵弾性率 E^* および損失正接 $\tan \delta$ の測定を行った。 $\tan \delta$ のピーク温度をTgの評価指標とした。

2.3.3 引張試験

引張試験機として（株）島津製作所製オートグラフ AGS-Jを用いて、JIS K6251「加硫ゴム及び熱可塑性ゴム—引張特性の求め方」に準ずる方法にて測定を行った。試験片の形状は、ダンベル状3号形で、試験片つかみ具の移動速度は、500 mm/分である。試験温度は、-40、-10、0、23℃とした。各測定温度において応力-ひずみ曲線とひずみ軸で囲まれる面積から破壊エネルギー F （MJ/m³）を求めた。

3. 実験結果

3.1 実車摩耗試験

Table 2には、加硫ゴムのTg、夏期および冬期に実施した実車摩耗テストの結果を示した。配合Bでは低温と高温の耐摩耗係数の差が大きい。一方、配合Bに比較して配合Cの耐摩耗係数の温度依存性が少なく、低温および高温のいずれの条件下においても耐摩耗係数が高かった。また、配合Dは配合AとCの中間的な位置づけにある。この様に、配合に依存して耐摩耗係数の温度依存性の傾向が異なることが示された。

3.2 動的粘弾性試験および引張試験

Figure 3には、配合A～Dの加硫ゴムの貯蔵弾性率の

Table 1 Formulation of rubber compounds in phr.

Recipe \ Name	A	B	C	D
NR	30	30	20	40
SBR (1) Tg = -16℃	70			
SBR (2) Tg = -12℃		70		
SBR (3) Tg = -22℃			52	
SBR (4) Tg = -25℃				60
BR			28	
Carbon Black (ISAF)	33	7	37	
Carbon Black (HAF)				62
Silica	23	60	56	
Process Oil	23	15	38	18

Table 2 Tg and wear resistance of rubber compound A-D.

Rubber compound	A	B	C	D
Tg (°C)	-16.0	-10.7	-32.9	-31.4
Wear Resistance (km/mm)@Summer ^{a)}	11630	12960	13780	12100
Wear Resistance (km/mm)@Winter ^{b)}	10350	10040	13920	12640

a) Temperature of the road surface : 27 °C

b) Temperature of the road surface : 7 °C

温度依存性を示した。配合C, Dに比較して, 配合A, BはTgが高く, -10 °C以下の温度領域で貯蔵弾性率が高かった。これは配合の主成分となるSBRのTgを反映した結果と考えられる。

Figure 4には, 配合A~Dの加硫ゴムの破壊エネルギーの温度依存性を示した。配合Cでは全ての温度条件で高い破壊エネルギーを示した。配合C, Dに比較して, 配合A, Bでは特に-40 °Cの破壊エネルギーが低かった。これはTg以下の温度でゴムの破断伸度が低下したことに基

づいた。

4. 考 察

Figure 5には, 路面骨材の凹凸で変形しているゴムを模式的に示した。ここで, 路面とゴムの接触面積 M が大きいほど, 単位面積あたりにかかるせん断力を小さくすることができ, 摩耗が抑制されるとして, 耐摩耗係数 W との間に次式を仮定した。

$$W = f(M) \quad (1)$$

Moore⁷⁾ らは, M がゴム材料の貯蔵弾性率 E^* に反比例すると報告していることから, (1) 式は次の(2) 式で示される。

$$W = f(E^{*-1}) \quad (2)$$

また, Grosch⁸⁾ およびPulford⁹⁾ らは摩耗と破壊特性について, 引張破断エネルギーとの相関を報告している。摩耗はゴムの破壊現象であることから, 破壊エネルギー F が高ければゴムの耐摩耗性能は増加することから, (3) 式の相関が与えられる。

$$W = f(F) \quad (3)$$

以上の因子を組み合わせると W は(4) 式でスケーリングすることができる。

$$W = c (F^a/E^{*b}) \quad (a, b, c \text{ は定数}) \quad (4)$$

(4) 式を対数表示に変形すると

$$\log W = a \log F - b \log E^* + \log c \quad (5)$$

と表せる。

ここで, F と E^* について, 摩耗現象は路面の凹凸の上を速い速度ですべっており路面の表面から変形を受ける現象である。この際, ゴムが受ける変形の周波数は $10^4 \sim 10^6 \text{ Hz}$ 程度と言われている¹⁰⁾。Groschらはゴム物性に対して時間-温度換算則が成り立つことを示している¹¹⁾。そこで, 低温の破壊エネルギー F および弾性率 E^* と耐摩

Figure 3 Temperature dependence of storage modulus E^* of rubber compound A-D.

Figure 4 Temperature dependence of fracture energy of rubber compound A-D.

Figure 5 Schematic of tire tread surface in contact with rough road surface.

耗係数 W の相関性について検討を行い、それらの物性値で実車摩耗評価結果が説明できるかの検証を行った。

ここで Figure 3, 4 で示したように、 F と E^* は温度依存性を示しており、いずれの温度領域の数値を用いて W を評価するかを検討するため、 W に対しての F および E^* の相関分析を行った。

一般に、 y に対する x の相関係数 R は、以下のように得られる。

$$(x, y) = \{(x_i, y_i)\} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \text{ が与えられたとき,}$$

$$R = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

ただし、 $\bar{x}$, $\bar{y}$ はそれぞれのデータの相加平均である。

得られた結果を Table 3 に示した。夏期の W 値は 0°C の F と、冬期の W 値は -40°C の F と E^* と高い相関性を示した。すなわち、実車摩耗試験結果が、実際の路面よりも低い温度でのゴム物性と相関することが明らかになった。このように摩耗と関連があるゴムの物性の温度領域が、低温側にシフトするのは、摩耗現象が路面の凹凸の上を速い速度ですべており、上述のように時間-温度換算則が関与したためと考えられる。

次に、耐摩耗係数 W と F および E^* の関係性を検討するため、(5) 式を重回帰式とし、夏の耐摩耗係数 $\log W @ \text{Summer}$ を目的変数とし、 0°C の $\log E^*$ と $\log F$ を説明変数として、 a, b, c を最適化する重回帰分析を実施した¹²⁾。

すなわち、(5) 式を (7) 式のとおり簡略化すると、

$$y = A + B_1 x_1 + B_2 x_2 \quad (7)$$

ここで、 $y = \log W$, $A = \log c$, $B_1 = a$, $x_1 = \log F$, $B_2 = -b$, $x_2 = \log E^*$ を示している。

実測値 y_{obe} は理論値 y_{est} との残差 e の和であることから次式が与えられる。

$$y_{\text{obe}} = y_{\text{est}} + e \quad (8)$$

ここで残差 e の2乗の総和（残差平方和 RSS）を最小にするように (9) 式を用いて係数を求める。

$$\text{MinRSS} = \sum (e)^2 = (y_{\text{obs}} - y_{\text{est}})^2 = \sum (y_{\text{obs}} - A - B_1 x_1 - B_2 x_2)^2 \quad (9)$$

RSS を A, B_1, B_2 で微分して 0 とすると

$$\sum (Y_{\text{obs}} - A - B_1 x_1 - B_2 x_2)^2 = 0$$

したがって、下記の正規方程式が得られる。

T をデータの標本数とすると

$$\sum y_t = T A + B_1 \sum x_{1t} + B_2 \sum x_{2t}$$

$$\sum x_{1t} y_t = A \sum x_{1t} + B_1 \sum x_{1t}^2 + B_2 \sum x_{1t} x_{2t}$$

$$\sum x_{2t} y_t = A \sum x_{2t} + B_1 \sum x_{1t} x_{2t} + B_2 \sum x_{2t}^2$$

これら正規方程式を解いて

$$A = y - B_1 x_1 - B_2 x_2$$

$$B_1 = (S_2^2 S_{1y} - S_{12} S_{2y}) / (S_1^2 S_2^2 - S_{12}^2)$$

$$B_2 = (S_1^2 S_{2y} - S_{12} S_{1y}) / (S_1^2 S_2^2 - S_{12}^2)$$

ただし、

$$S_1^2 = \sum (x_{1t} - \bar{x}_1)^2, \quad S_2^2 = \sum (x_{2t} - \bar{x}_2)^2,$$

$$S_y^2 = \sum (y_t - \bar{y})^2,$$

$$S_{12}^2 = \sum (x_{1t} - \bar{x}_1)(x_{2t} - \bar{x}_2),$$

$$S_{1y}^2 = \sum (x_{1t} - \bar{x}_1)(y_t - \bar{y}),$$

$$S_{2y}^2 = \sum (x_{2t} - \bar{x}_2)(y_t - \bar{y})$$

以上より、 a, b, c を求めることができる。

同様に、耐摩耗係数 $\log W @ \text{Winter}$ を目的変数として、 -40°C の $\log E^*$ と $\log F$ を説明変数として、重回帰分析を実施した。

この解析により (5) 式における係数を設定することが可能となり、予測式を決定することができる。

Figure 6 には、重相関解析で得られた予測式と実車摩耗テスト結果の関係を示した。図より実車の耐摩耗係数と (5) 式から予測できる耐摩耗係数の間には高い相関性が観察された。Table 4 には、得られた重相関係数を示した。夏期および冬期それぞれで高い重相関係数が得られた。このことは、(5) 式を用いて今回の実車摩耗テスト結果をスケーリングできることを意味している。すなわち、冬期の

Table 3 Correlation coefficients between the observed wear resistance and physical properties F, E^* at each temperature.

Physical property	Wear resistance@Summer	Wear resistance@Winter
$F @ -40^\circ\text{C}$	0.293	0.964 ++
$F @ -10^\circ\text{C}$	0.676 +	0.294
$F @ 0^\circ\text{C}$	0.640 +	0.350
$F @ 23^\circ\text{C}$	0.580	0.404
$E^* @ -40^\circ\text{C}$	-0.552	-0.994 ++
$E^* @ -30^\circ\text{C}$	-0.364	-0.976 ++
$E^* @ -20^\circ\text{C}$	-0.194	-0.925 ++
$E^* @ -10^\circ\text{C}$	-0.073	-0.730 +
$E^* @ 0^\circ\text{C}$	0.010	-0.013
$E^* @ 10^\circ\text{C}$	0.041	0.386
$E^* @ 20^\circ\text{C}$	0.052	0.488

+ :over '0.6', ++ :over '0.8'

Figure 6 Correlation between predicted wear resistance and observed wear resistance of rubber compound A-D in (○) summer and (●) winter.

摩耗性能結果は -40°C のゴムの特性で、夏期の摩耗性能結果は 0°C のゴムの特性を指標にできることが示された。また、冬期の結果では破壊エネルギーおよび貯蔵弾性率 E^* 両者の耐摩耗性能係数に対する相関係数は高いが、夏期の結果においては、破壊エネルギーの耐摩耗性能係数に対する相関係数が高いことが明らかになった。これは夏期においては 0°C 付近の物性が影響すると考えられるが、その温度領域においてはいずれのゴムも貯蔵弾性率 E^* が小さくなっており、相対的に耐摩耗係数に対して破壊エネルギーの寄与が大きくなったためと考えられる。

以上のことから、ゴムの摩耗現象は

- 1) ゴムの低温物性と相関があること。
 - 2) ゴムの破壊エネルギー F と貯蔵弾性率 E^* が関与していること。
 - 3) 環境温度により破壊エネルギーの寄与と貯蔵弾性率 E^* の寄与が変化すること
- が明らかになった。

Table 4 Parameter of wear resistance as a function of fracture energy F and storage modulus E^* in equation (5) and the correlation coefficient between calculated and observed data for rubber compounds A-D.

Condition	a	b	c	R
Summer	0.811	0.250	7.179	0.997++
Winter	0.025	0.162	10.448	0.994++

5. 結 論

同一車両にて異なる路面温度での摩耗性能を測定した結果、摩耗はタイヤ配合の温度依存性に影響を受けることが示された。この際、耐摩耗性能係数 W は、低温のゴムの破壊エネルギー F (MJ/m^3) および貯蔵弾性率 E^* (Pa) との間に関連があり、次の関数でスケーリングできることが明らかになった。

$$W = c (F^a / E^{*b}) \quad (a, b, c \text{ は定数})$$

また、環境温度が変化するとそれぞれの物性値に温度依存性があり、摩耗への寄与が変化した。

References

- 1) Grosch, K. A.; Schallamach, A.: *Wear*, **4**, 356 (1961)
- 2) Grosch, K. A.: *Rubber Chem. Technol.*, **69**, 495 (1996)
- 3) Mouri, H.: *Zairyo Kagaku*, **34**, 25 (1997)
- 4) Uchiyama, Y.: *Nippon Gomu Kyokaishi*, **80**, 120 (2007)
- 5) Kienle, R. N.; Dizon, E. S.: *Rubber Chem. Technol.*, **44**, 996 (1971)
- 6) Veith, A. G.: *Polymer Testing*, **7**, 177 (1987)
- 7) Moore, D. F.; Geyer, W.: *Wear*, **22**, 113 (1972)
- 8) Grosch, K. A.; Schallamach, A.: *Rubber Chem. Technol.*, **39**, 287 (1966)
- 9) Gent, A. N.; Pulford, C. T. R.: *J. Appl. Polym. Sci.*, **28**, 943 (1983)
- 10) Saito, Y.: *Kautschuk Gummi Kunststoffe*, **39**, 30 (1986)
- 11) Grosch, K. A.: *Rubber Chem. Technol.*, **37**, 386 (1964)
- 12) Mukherjee, S. N.; Basu, S. K.: *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, **7**, 15 (1967)

日本語表記参考文献

- 3) 毛利 浩：材料科学, **34**, 25 (1997)
- 4) 内山吉隆：日本ゴム協会誌, **80**, 120 (2007)