

# 砕石路面におけるゴム材の摩耗特性と ゴム履帯の摩耗寿命予測

河原荘一郎<sup>1</sup>・室 達朗<sup>2</sup>・深川良一<sup>3</sup>・建山和由<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 愛媛大学助手 工学部土木海洋工学科 (〒790-77 松山市文京町3)

<sup>2</sup>正会員 工博 愛媛大学教授 工学部土木海洋工学科 (〒790-77 松山市文京町3)

<sup>3</sup>正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部土木海洋工学科 (〒790-77 松山市文京町3)

<sup>4</sup>正会員 工博 京都大学講師 工学部土木工学科 (〒606 京都市左京区吉田本町)

ブルドーザの履帯用ゴム材の摩耗特性を解明するため、代表的な耐摩耗ゴムからなる試験片に対して砂岩からなる砕石路面における摩耗試験を行った。ここではゴム材の摩耗特性に及ぼすゴムの材質、接地圧、摩耗に関する雰囲気（乾燥、水浸）、ならびに路面粗さの影響について考察を加えた。さらに、この結果を利用してブルドーザのゴム履帯の摩耗寿命予測を行う手法を提案した。

**Key Words** : rubber, abrasive wear, roughness of terrain, track belt, model test

## 1. まえがき

耐摩耗ゴム材料はダンプトラック、ホイールローダのタイヤとして、また最近ではミニパワーショベル、小型ブルドーザの履帯として使用され、その用途はますます広がりつつある。ゴム履帯は鋼製のものに比べて騒音・振動が少なく、コンクリートやアスファルトの舗装路面上での走行および作業が可能となるなどのいくつかの利点を有する。その反面、砕石などによりカットが入りやすく、また一般にブルドーザの履帯はスリップが激しいため鋼製のものに比べ摩耗寿命がかなり短くなるなどの欠点がある。したがって、耐摩耗ゴム材料の摩耗特性およびカット特性を解明し、ゴム履帯の寿命を向上させることは施工計画の合理化やコスト削減の上で重要な課題である。

一般に、摩耗はその原因により、凝着摩耗、アブレシブ摩耗、腐食摩耗および疲れ摩耗の4つの基本的なタイプに分類されることが多い<sup>1)</sup>。土工機械の足廻りとしてのゴム材の摩耗はその中でアブレシブ摩耗に分類され、ゴム材料の物性、路面粗さ、接触面圧（接地圧）、摺動距離（スリップ量）および摩耗に関する雰囲気（乾燥、水浸）などの影響を受ける。しかし、これらの因子がどの程度ゴムの摩耗に影響を及ぼすかについては、よく判っていない。と

くに、相手材料である路面の粗さの影響についてはほとんど解明されていないのが実状である。従来、筆者らは重ダンプトラック用タイヤ、ならびにホイールローダ用タイヤの摩耗について、現地調査・室内実験を行い摩耗特性を明らかにしてきた<sup>2)-4)</sup>。

本研究は、最も苛酷な摩耗条件である砕石路面における履帯用ゴム材の摩耗特性を解明することを目的とするものである。ここでは、種々の路面粗さ、摩耗に関する雰囲気（乾燥、水浸）および接触面圧の条件を組み合わせ、代表的な耐摩耗ゴム材からなる試験片に対する室内摩耗試験を行い、主にゴム材の物性および路面粗さがゴムの摩耗特性に及ぼす影響について考察する。さらに、ブルドーザ用ゴム履帯の摩耗寿命予測式を提案し、摩耗対策について述べる。

## 2. ゴム供試体および供試路面

### (1) ゴム供試体

土工機械の足廻りとして、ゴム材には耐摩耗性と耐カット性の両者に優れることが要求される。一般に天然ゴム（NR）は耐摩耗性に優れているが、耐カット性には劣る。一方、スチレンブタジエンゴム（SBR）は耐カット性に優れているが、耐摩耗性には劣るといわれている。そこで、両者のゴム材を

Table 1 Properties of rubber specimens

Rubber	Material	$H_s$	$E_b$ (%)	$T_b$ (MPa)	$T_r$ (kN/m)
A1	NR/SBR	62	573	20.8	64.4
A2	NR/SBR	56	635	23.5	40.2
A3	NR/SBR	69	541	22.0	69.6
B	SBR/NR	63	623	22.1	56.9
C	NR	63	575	23.4	94.1
D	SBR	63	679	22.3	45.1
E	IR	62	698	22.9	75.5
F	U	92	573	46.0	95.4

$H_s$ : Hardness  $E_b$ : Elongation

$T_b$ : Tensile strength  $T_r$ : Tear strength

Table 2 Surface Properties of model roads

Road	Grain size $d$ (mm)	Pitch of gravel $\lambda$ (cm)	$SD$ (mm)	$P_1 \times 10^3$ (cm <sup>2</sup> /cm)
Mortar			0.35	0.35
1	2.00-4.76	2.14	0.80	1.35
2C	4.76-9.52	2.19	1.56	1.67
3	9.52-15.0	1.95	1.73	18.62
4	15.0-19.1	1.97	3.81	92.45
2A	4.76-9.52	1.21	1.87	25.17
2B	4.76-9.52	1.66	1.41	15.20
2D	4.76-9.52	2.92	1.25	10.05

$SD$ : Standard deviation of roughness

$P_1$ : Power spectrum density ( $\Omega = 0.333$  /cm)

経験的にブレンドして使用しているのが現状である。

ゴム供試体として、Table 1 に示す 8 種類の耐摩耗ゴム材を使用した。ゴム供試体 A1, A2, A3 は NR に SBR をブレンドしたもの (NR/SBR) でありゴム硬さを変えている。ゴム供試体 B は SBR に NR をブレンドしたもの (SBR/NR) である。供試体 C, D, E, F はそれぞれ天然、スチレンブタジエンゴム、イソプレングム (IR)、ウレタンゴム (U) である。ゴム供試体 A1, B, C, D, E の 5 種類は、硬さを  $H_s = 62 \sim 63$  に揃えている。ゴム供試体の大きさはすべて直径 30 mm, 高さ 30 mm の円柱形である。

## (2) 供試路面

路面粗さの異なる 8 種類の供試路面 (300 mm 四方, 高さ 130 mm) を作成した。1 つはモルタルの表面で、その他の路面はモルタルの土台にセメントで砂岩からなる砕石を体積の半分程度固結したものである。供試路面の性状を Table 2 に示す。砕石の

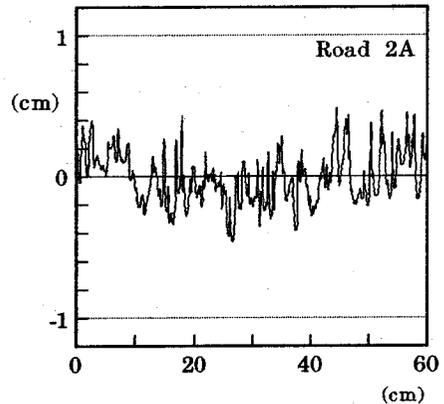


Fig.1 An example of surface of model road

ピッチ  $\lambda$  は後述する半径 10.3 cm の摺動中心円上の砕石数で周長を除いて求めた。路面 1, 2C, 3, 4 は砕石のピッチを 2 cm に固定して粒徑を変化させたグループ、また路面 2A, 2B, 2C, 2D は砕石の粒徑を固定してピッチを変化させたグループである。一例として路面 2A の凹凸を Fig.1 に示す。供試路面の凹凸の測定には感量 0.1 mm の超音波変位計を使用した。

路面粗さを表す指標としては、砕石の粒徑  $d$ 、ピッチ  $\lambda$ 、凹凸の標準偏差  $SD$ 、パワースペクトル密度  $P$ 、卓越路面周波数  $\Omega_p$  が挙げられる。一般に、砕石の粒徑が大きくピッチが小さいものほど路面は粗く見え、ここでも標準偏差  $SD$  はほぼその順に大きくなっている。ただ、標準偏差ではどれ位の波長の凹凸が、どの程度の強さを持つかを表すことができない。そこで、パワースペクトル密度分布を高速フーリエ変換<sup>5)</sup>を用いて解析した。代表的な路面のパワースペクトル密度分布を Fig.2 に示す。パワースペクトル密度は砕石の粒徑が大きくピッチが小さいものほど大きい。また、路面に関わらず分布曲線の傾きはほぼ一定であり、卓越したパワースペクトル密度を示す路面周波数はみられない。そこで、ゴム供試体の底面長と同じ波長 3 cm (路面周波数  $\Omega = 0.333$  /cm) におけるパワースペクトル密度  $P_1$  を求め、路面粗さの指標とした。

## 3. 実験装置および方法

### (1) 実験装置

ゴム材料の耐摩耗性を評価するため、様々な機構の室内試験機が古くから考案されているが、日本工業規格に規定されるような決定的な試験法が今だになく最終的には実地試験に依存せざるを得ないのが

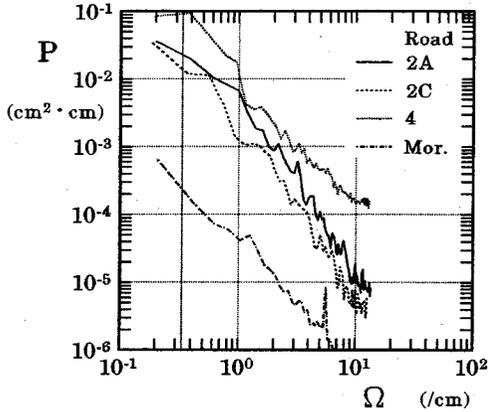


Fig.2 Distribution of power spectrum density of model roads

実状である<sup>6)</sup>。また、これら考案された室内試験機は、例えばゴム材の接触面圧を変化させることができないなど、タイヤやゴム履帯と路面との摩擦機構を十分に再現するものとはいえない。

そこで、筆者らが開発した耐摩耗鋼用の室内摩耗試験機<sup>7)</sup>をベースとするピンディスク型の摩耗試験装置を使用して一連の実験を行った (Fig.3)。この装置は、出力 7.5 kW のモーターにより直径 40 cm の回転テーブル上の供試路面を回転させ、所定の圧力で押し付けられたゴム供試体を摩耗させるものである。ゴム供試体の押し付けは、最大容量 7.62 kN の空気圧シリンダーによって行われる。ゴム供試体はホルダー部に 21 mm 埋め込まれた、すなわちホルダーより 9 mm はみ出した状態で実験に供した。

## (2) 実験方法

供試路面上半径 10.3 cm の位置にゴム供試体をセットし、乾燥および水浸状態で摺動させた。1 回の実験は、摺動速度 61 cm/s (2.2 km/h) にて、約 4 秒間、距離約 220 cm とした。その間のゴム供試体の質量変化を感量 0.1 mg の電子天秤にて計測した。また、発生したゴム摩耗粉はその都度吸引除去した。水浸状態では接触面に先端口径 1.5 mm のノズルより流量約 40 ml/s の水道水を噴射させた。

実機の作業は比較的短い時間の繰返しであり、しかもゴム材の摩耗には作業時間よりもゴム材の受けるスリップ量が重要である。本実験の摺動距離 (= スリップ量) 約 220 cm は、苛酷なスリップ率 (5. (1) で定義) 10% で実機の走行距離約 22 m に相当する。この走行距離は、実機の作業 1 回当たりの走行距離として妥当であると考えられる。

また、ゴム材の摩耗を評価する試験方法が確立していない現状に対し、本実験方法は第一段階として、

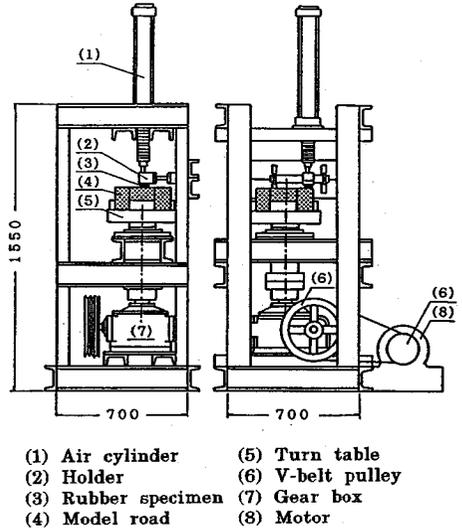


Fig.3(a) An apparatus for wear test of rubber specimen

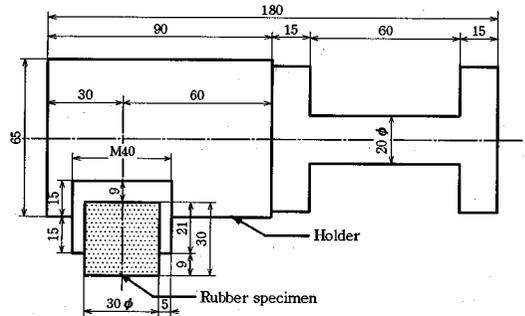


Fig.3(b) Rubber Specimen and its holder

様々な要因、とりわけ路面粗さがゴム材の摩耗に及ぼす影響を定量的に推定することを目指したものであり、これは工学的意義があると考えられる。

ゴムの摩耗に関係すると考えられる以下の 3 つの要因について、一連の実験を行った。

### 実験シリーズ① (ゴム材料の硬さ以外の物性)

硬さが同じで原材料が異なるゴムに対して、硬さ以外の物性が摩耗に及ぼす影響について調査する。硬さ  $H_s = 62 \sim 63$  のゴム供試体 A1, B, C, D, E の 5 種類に対して、モルタル路面および碎石路面 2A の 2 路面において同一条件下で 3 回繰返し実験を行い、摩耗量の平均値を求めた。接触面圧はその影響を詳しく調べるため、0.119 ~ 1.655 MPa の範囲で最高 10 段階に設定した。

### 実験シリーズ② (ゴム材料の硬さ)

原材料が同じで硬さの異なるゴムに対して、硬さが摩耗に及ぼす影響を調査する。NR/SBR のゴム供

試体 A1, A2, A3 に対して, モルタル路面および碎石路面 2A の 2 路面において 50 回を限度として実験を行い, 摺動距離と摩耗量を測定した. 接触面圧はモルタル路面で 0.119, 0.405 MPa, 路面 2A で 0.119, 0.303 MPa に設定した.

#### 実験シリーズ③ (路面粗さ)

路面粗さの影響を調査する. 比較的軟質なゴム材としてゴム供試体 A1 (NR/SBR) および硬質なゴム材質としてウレタンゴムのゴム供試体 F に対して, モルタル路面および碎石路面 7 通りの計 8 種類の路面において同一条件下で 5 回繰り返し実験を行い, 摩耗量の平均値を求めた. 接触面圧は 0.119, 0.405 および 0.631 MPa の 3 段階に設定した.

実験シリーズ②におけるゴム供試体の摩耗量が, 実験回数 50 回までの長い摺動距離に比例するのであれば, 摩擦熱による材質変化が摩耗量に及ぼす影響はほとんどないとみなせる. これを予め確認したので, 実験シリーズ①, ③における 3 回, 5 回といった少ない実験回数からも長い摺動距離に対する摩耗量を外挿することが可能であると判断した.

### 4. 実験結果と考察

#### (1) 摩耗形態

まえがきで述べたように, ゴム材料の摩耗はそれが起こる原因により「アブレシブ摩耗」に分類される.

「アブレシブ摩耗 (すりへり摩耗)」: 硬い表面上の突起や硬い粒子の微小切削作用によって生じる摩耗<sup>1)</sup>

さらに, アブレシブ摩耗よりも程度の大きい摩耗を, ここでは便宜上「衝撃摩耗」と呼ぶ.

「衝撃摩耗」: 粒径の大きい砂粒子または礫の衝突による動的な切削作用によって生じる摩耗

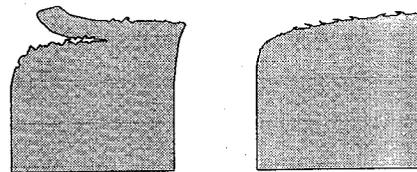
また, 切口や傷口のあるゴムはわずかな力で引裂きを生じやすい. ここでは, ゴム供試体の側面に何らかの裂け目が入る状態を「引裂き」と呼ぶ. 引裂きは, 衝撃摩耗の結果として現れる現象であり, ある接触面圧を越えると発生する. 引裂きが発生すると, 将来ゴム塊の離脱にともなう多大な摩耗をひき起こす可能性がある.

摩耗実験後の各ゴム供試体を観察すると, モルタル路面においては, どのゴム供試体でも底面がやすりで削ったように摩耗しており, すりへり摩耗によると考えられる. これに対して, 碎石路面では碎石によってすりへり摩耗に比べ大きくひっかかれた跡が残っており, 衝撃摩耗によると考えられる.

実験シリーズ①において, 初めて引裂きの発生し

Table 3 Contact pressure at which tear generates in rubber specimens

Road	Rubber	Contact pressure $p$ (MPa)	
		Dry	Submerged
2A	A1	0.631	0.836
	B	0.631	0.159
	C	0.405	0.221
	D		0.159
	E	0.631	1.142
Mortar	B		1.655
	E	1.655	

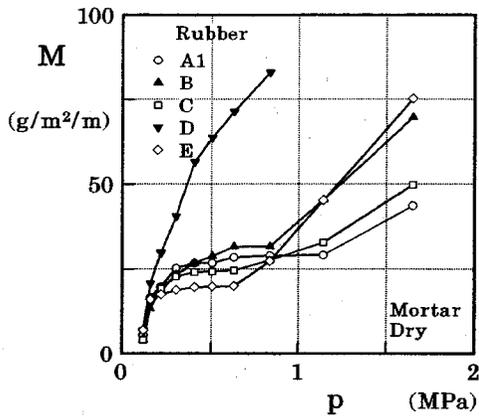


Rubber A (NR/SBR) Rubber F (U)

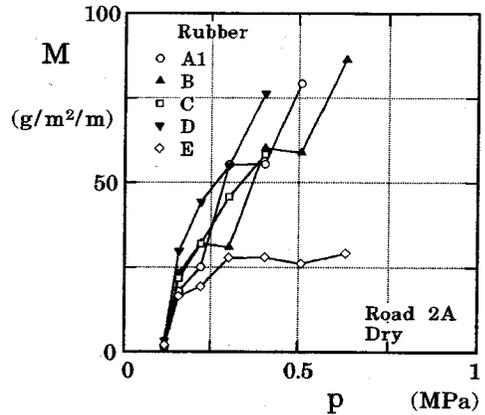
Fig.4 Typical examples of wear shape of rubber specimens

た接触面圧を Table 3 に示す. モルタル路面においては, 引裂きは発生しなかったか, 発生しても高い面圧においてであった. 碎石路面 2A の乾燥状態において, ゴム供試体 D (SBR) を除く全てのゴム材において, 接触面圧 0.5 MPa 付近で引裂きが発生した. 0.4 MPa 以下の低い接触面圧ではゴム供試体は供試路面に対して底面が接触していた. しかし, それ以上の高面圧ではゴム供試体は供試路面に押し付けられ, 進行前面角部が碎石と衝突するという状態を経て引裂きが発生し, 底面部分は接触しないためほとんど摩耗せず側面部がえぐり取られた形で摩耗していた. ただし, 引裂きが発生したからといってすぐに小片がとれ摩耗量が急増するわけでない. また, 水浸状態において乾燥状態より低い面圧で引裂きが発生したことがある. しかし, これらの場合を含め水浸状態の全てのゴム供試体において, 乾燥状態に比べ引裂きの程度は軽く, 引裂きが大きく成長することはなかった.

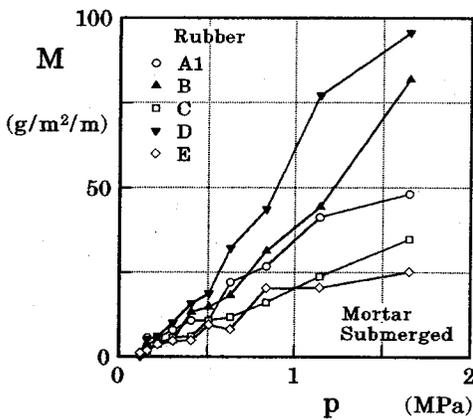
実験シリーズ③において, Fig.4 に典型的な例としてゴム供試体 A1, F の  $p = 0.631$  MPa における摩耗形態を示す. ゴム供試体 A1 (NR/SBR) では,  $p = 0.405$  MPa で程度の違いはあるが, 引裂きがどの碎石路面でも発生した. 一方, ゴム供試体 F (U) では, どの碎石路面でも引裂きは発生せず, 進行前



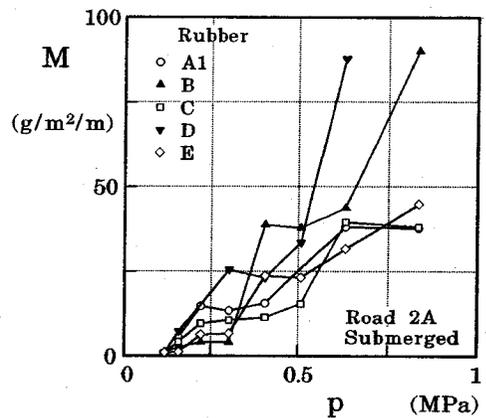
(a) Mortar, dry



(c) Road 2A, dry



(b) Mortar, submerged



(d) Road 2A, submerged

Fig.5 Relation between amount of wear  $M$  and contact pressure  $p$

面角部が最も摩耗しているもののA1に比べ底面全体で摩耗している。両者のゴムの摩耗形態の違いは、以下の原因によると考えられる。ゴム供試体A1 (NR/SBR)では、硬さが小さいため実験中せん断変形が大きく進行前面角部が碎石と衝突するようになり、また引裂強さも弱いためゴム供試体の側面に引裂きが発生する。これに対して、ゴム供試体F (U)では、硬さが大きいため実験中せん断変形が小さく、したがって進行前面角部が碎石と衝突する程度が軽く、また引裂強さも強いため引裂きが発生せず進行前面角部が衝撃的に摩耗する。

## (2) 摩耗量と接触面圧の関係

実験シリーズ①におけるゴム供試体A1～Eに対する単位摩耗量 $M$ と接触面圧 $p$ の関係をFig.5(a)～(d)に示す。ここで、単位摩耗量 $M$ は単位接触面積当たり単位摺動距離当たりの摩耗質量として $g/m^2/m$ なる単位で表示している。どの条件下でも単位

摩耗量 $M$ は接触面圧 $p$ が高くなるにしたがってほぼ直線的に増加している。碎石路面2Aにおける水浸状態の摩耗量は乾燥状態の半分程度である。モルタル路面においても接触面圧 $p = 0.5$  MPa以下では水浸状態の摩耗量は乾燥状態の半分程度であるが、面圧が高くなるにつれてその差は小さくなる。これは、水による冷却効果や、水が潤滑剤としてゴム材と路面との間の摩擦係数を低減させることによる。しかし、 $p = 0.5$  MPa以上の高面圧においては、接触面圧が高くなるにしたがいゴム供試体の接触面と路面の間に水が侵入しにくくなり、潤滑剤としての水の効果が次第に失われるためと考える。

ゴム材料を比較すると、ゴム供試体E (IR)はややよい耐摩耗性を示しているが、逆にゴム供試体D (SBR)がどの条件下においても摩耗量が多い。なお、引裂きを起こした小片がとれ摩耗量が急増したり、ホルダーと碎石とが当たるため $p = 0.5$  MPa以上ではデータが得られない場合もあった。

Table 4 Experimental results of coefficients  $a_0$ ,  $a_1$  in the eq.(1)

Road	Rubber	Atmosphere	$a_0$ (g/m <sup>2</sup> /m)	$a_1$ (μg/m/N)	$p_0$ (MPa)	$r$
Mor.	A1	Dry	14.8	17.2	0.000	0.857
		Sub.	-1.3	32.3	0.039	0.982
	B	Dry	7.9	35.8	0.000	0.969
		Sub.	-8.3	50.4	0.164	0.982
	C	Dry	11.2	22.3	0.000	0.929
		Sub.	-1.6	21.9	0.071	0.998
	D	Dry	12.9	82.4	0.000	0.981
		Sub.	-8.7	65.6	0.133	0.990
	E	Dry	3.7	38.4	0.000	0.957
		Sub.	-0.2	17.0	0.012	0.956
2A	A1	Dry	-14.3	187.3	0.077	0.970
		Sub.	-0.1	49.6	0.003	0.944
	B	Dry	-6.1	143.5	0.043	0.964
		Sub.	-35.1	154.6	0.227	0.941
	C	Dry	-12.6	184.3	0.068	0.967
		Sub.	-5.6	54.9	0.101	0.931
	D	Dry	-26.3	293.0	0.091	0.993
		Sub.	-49.2	231.0	0.213	0.987
	E	Dry	7.7	40.5	0.000	0.783
		Sub.	-30.1	124.7	0.242	0.964

一般に、摩耗量は摩擦仕事に比例すると考えられるので、単位摩耗量  $M$  (g/m<sup>2</sup>/m) と接触面圧  $p$  (MPa) との関係は次式の直線で表されるものと予想される。

$$M = a_0 + a_1 \cdot p \quad (1)$$

$a_0$  (g/m<sup>2</sup>/m)       $a_1$  (μg/m/N) : 実験定数

接触面圧が小さく摩擦仕事が少ないうちは弾性範囲にあり摩耗は生じないと考えると、切片  $a_0$  は負となる。この式を Fig.5 で示した実験に適用した結果を Table 4 に示す。ここで、 $p_0$  は式(1)の  $p$  軸切片 ( $= -a_0/a_1$ ) で、摩耗が始まる接触面圧である。ただし、モルタル路面における乾燥状態のように  $p_0$  が負となる場合は 0 とした。この場合  $a_0$  が正となるが、これは  $p = 0.159$  MPa (第 2 点目) 以上の摩耗量  $M$  の増加量が、それ以下の接触面圧におけるものに比べ小さいことに起因しており、実際には図より  $p_0 = 0$  MPa とみなしてよいと考える。相関係数がほとんどの場合 0.9 以上あり相関性が高いので、摩耗量は接触面圧が高くなるにしたがって直線的に増加するといえる。

### (3) ゴムの物性と摩耗量の関係

まず、ゴム材料の硬さの影響について単位接触面積当りの摩耗量  $M$  と摺動距離  $X$  の関係を Fig.6 に示す。摩耗量  $M$  は摺動距離  $X$  に比例して増加する。

単位摩耗量  $M$  とゴム硬さ  $H_s$  の関係を Fig.7 に示す。乾燥状態の  $p = 0.119$  MPa の様に、ゴム硬さ  $H_s$  が増加するにしたがい摩耗量が減少する場合があるものの、本実験の範囲ではゴム硬さの摩耗量に及ぼす影響は顕著にはみられない。

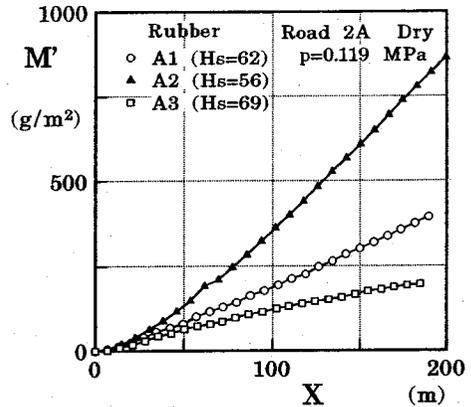


Fig.6 Relation between amount of wear per unit sliding distance  $M'$  and sliding distance  $X$

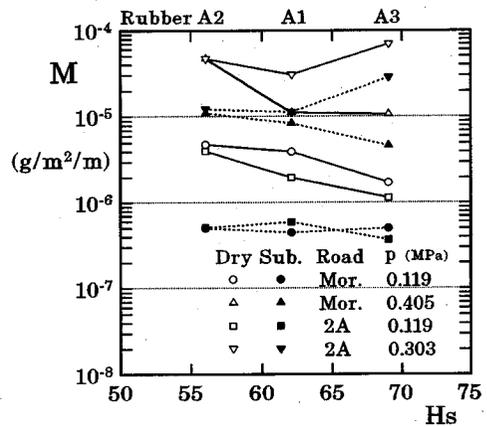
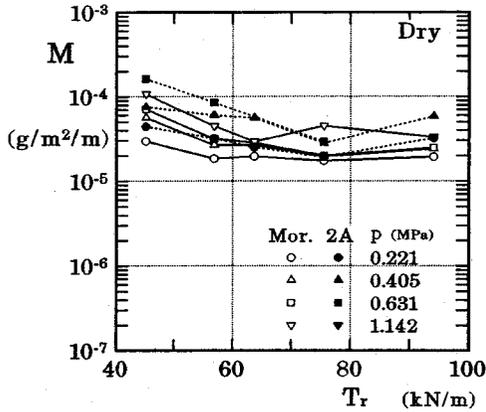


Fig.7 Relation between amount of wear  $M$  and hardness of rubber specimens  $H_s$

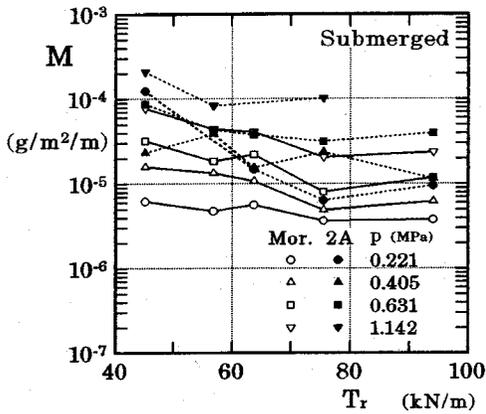
次に、ゴム材料の硬さ以外の物性の影響について、具体的に伸び、引張強さ、引裂強さ等のゴムの摩耗に対する相関性を検討した。その中で、比較的相関性の高かった引裂強さ  $T_r$  と単位摩耗量  $M$  の関係を Fig.8 に示す。引裂強さ  $T_r = 45.1$  から  $56.9$  kN/m にかけて摩耗量  $M$  が減少する場合があるものの、それ以上の引裂強さ  $T_r$  では摩耗量  $M$  はほぼ横ばいであり、本実験の範囲では引裂強さの摩耗量に及ぼす影響は顕著にはみられない。

### (4) 路面粗さと摩耗量の関係

まず、単位摩耗量  $M$  と碎石のピッチ  $\lambda$  の関係を Fig.9 に示す。  $p = 0.119$  MPa の低接触面圧を除けば、ピッチ 1.7 cm 付近で各条件とも摩耗量のピークを示す。ピッチが大きくなると、ゴムが碎石と衝突する回数が少なくなると同時に土台のモルタルと

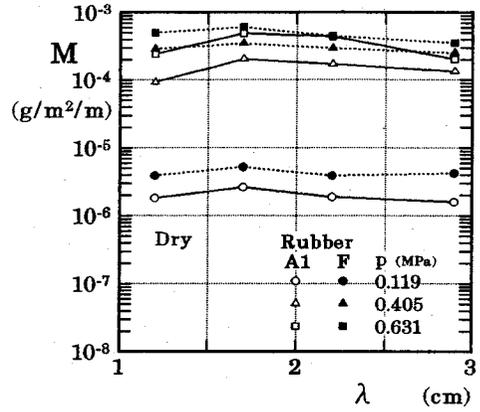


(a) Dry

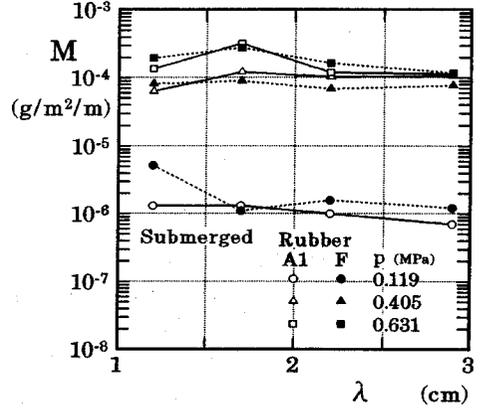


(b) Submerged

Fig.8 Relation between amount of wear  $M$  and tear strength of rubber specimens  $T_r$



(a) Dry



(b) Submerged

Fig.9 Relation between amount of wear  $M$  and pitch of gravels on model roads  $\lambda$

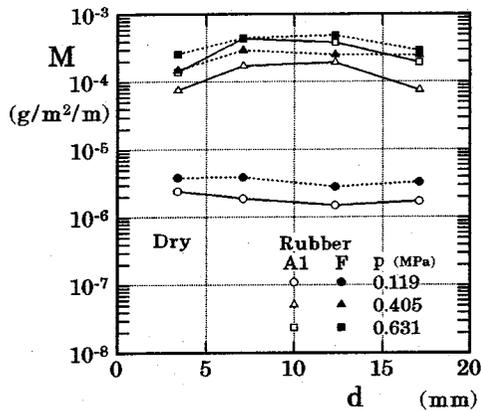
接触する割合が大きくなり、衝撃摩耗の割合が低下し摩耗量は減少する。一方、ピッチが小さくなりある程度密になりすぎると、かえってゴム供試体の進行前面角部が碎石と衝突しにくくなり、摩耗量は減少すると考えられる。

次に、単位摩耗量  $M$  と碎石の粒径  $d$  の関係を Fig.10 に示す。ここで、 $d$  は粒径の上下限の平均値を使用した。  $p = 0.119$  MPa の低接触面圧を除けば、粒径 7 ~ 13 mm 付近で各条件とも摩耗量のピークを示す。観察によると、粒径が大きいとゴム供試体の進行前面角部が碎石と衝突することなく単に山の斜面に沿って摺動するため、摩耗量は減少すると考えられる。

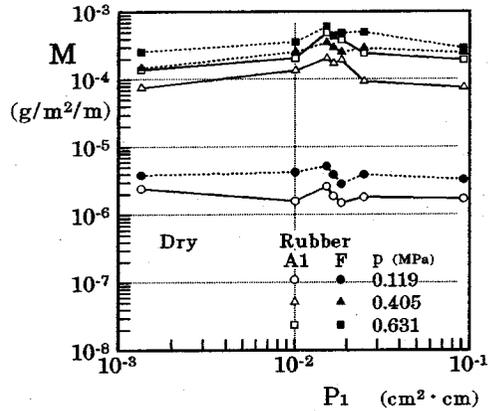
単位摩耗量  $M$  とゴム供試体の底面長と同じ波長の路面周波数  $\Omega = 0.333/\text{cm}$  に対するパワースペクトル密度  $P_1$  の関係を Fig.11 に示す。全体的に、 $P_1 = 1.5 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{cm}$  付近で摩耗量のピークを示す

傾向がある。なお、その他の路面周波数に対するパワースペクトル密度と摩耗量の間には、明瞭な関係がみられなかった。凹凸の標準偏差には 2.(2) で前述した問題があるので、碎石の粒径、ピッチの影響を含めた路面粗さを表す指標として、ゴム供試体の底面長と同程度の波長の凹凸の大きさが摩耗に最も影響を及ぼすと考えられる。

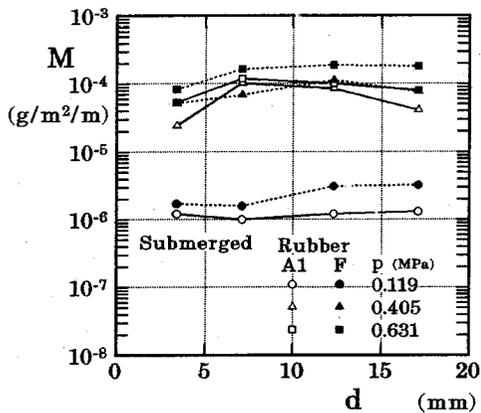
さらに、ゴム供試体 A1 (NR/SBR) とゴム供試体 F (U) の違いについて考える。Table 5 は最もゴムの摩耗が激しい碎石路面 2B とモルタル路面における両者のゴムの摩耗割合を、ゴム供試体 A1 のモルタル路面における乾燥状態の摩耗量を 1 として示したものである。モルタル路面では、ゴム供試体 F (U) の摩耗量はゴム供試体 A1 (NR/SBR) に比べかなり多い。しかし、モルタル路面に対する碎石路面 2B の摩耗量の割合でみると、ゴム供試体 A1 (NR/SBR) では 20 倍近くに達するのに対し、



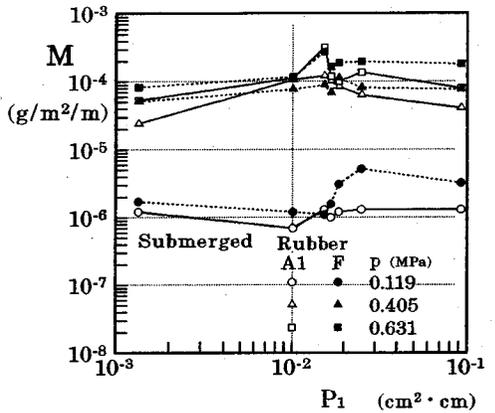
(a) Dry



(a) Dry



(b) Submerged



(b) Submerged

Fig.10 Relation between amount of wear  $M$  and grain size on model roads  $d$

Fig.11 Relation between amount of wear  $M$  and power spectrum density of model roads  $P_1$

ゴム供試体 F (U) では 7 倍以内に収まっている。しかも、ゴム供試体 F (U) の摩耗量は、砕石路面 2B における摩耗量の絶対量でも、ゴム供試体 A1 (NR/SBR) とほとんどかわらない。したがって、ゴム供試体 A1 (NR/SBR) に代表される軟質なゴムは、モルタル路面におけるすり減り摩耗に対して強く、その反面砕石路面における衝撃摩耗に対しては比較的弱い。ゴム供試体 F (U) のような硬質なゴムは、その逆で路面粗さの影響を比較的受けにくいといえる。

ところで、Fig.9 ~ 11 より接触面圧が変化することによる単位摩耗量の変化が、砕石のピッチ、粒径、パワースペクトル密度などの路面粗さのものよりかなり大きいことがわかる。したがって、砕石路面におけるゴムの摩耗量は接触面圧の影響が大きく、次いで摩耗に関する雰囲気（乾燥、水浸）の影響がやや大きく、路面粗さの影響は比較的小さい。

Table 5 Effects of various conditions on the wear of rubber specimens

Atmosphere	Road	Ratio of wear weight	
		Rubber A1	Rubber F
Dry	Mortar	1.00	8.60
	2B	17.16	21.45
Submerged	Mortar	0.58	1.51
	2B	11.38	9.70

$p = 0.631$  MPa

$M = 28.5$  g/m<sup>2</sup>/m (rubber A1, mortar, dry)

## 5. 摩耗寿命予測

### (1) 予測方法

ブルドーザの履帯にはグラウサと呼ばれる突起があり、グラウサ間に挟まれた土と地盤とのせん断抵

抗を反力としてブルドーザは推進力を発揮する。このグラウサが摩耗すると土をグリップしにくくなるので、通常グラウサの高さで摩耗限界を定めている。

ここでは、グラウサが路面に貫入しないような硬い路面におけるゴム履帯の摩耗寿命を予測する式を提案する。グラウサの縦断面形状は、簡単のため Fig.12 に示す長方形と仮定する。駆動状態において、スリップ率  $i$ 、履帯接地長  $D$  (m) の履帯が 1 回転するときグラウサは距離  $iD$  のスリップを受ける。ここで、スリップ率  $i$  は次式で定義される。

$$i = 1 - \frac{v'}{v} \quad (0 \leq v' \leq v) \quad (2)$$

$v'$  : 車両速度 (m/h)     $v$  : 履帯周速度 (m/h)  
このときのグラウサの摩耗損失部分の高さを  $dH$  (m) とすると、実験結果より摩耗した部分の体積は次式で表される。

$$dH \cdot C \cdot B = M \cdot i \cdot D \cdot C \cdot B / \rho \quad (3)$$

$B$  : 履帯幅 (m)     $C$  : グ라우サの先端長 (cm)

$\rho$  : ゴム材の密度 (Mg/m<sup>3</sup>)

したがって、 $dH$  は次式で与えられる。

$$dH = M \cdot i \cdot D / \rho \quad (4)$$

ゴム履帯の摩耗限界を初期グラウサ高さ  $H$  (m) の  $\alpha_c$  倍とすると、限界回転数  $n_c$  (回) および摩耗寿命  $t_c$  (h) は次式で算定できる。

$$n_c = \frac{(1 - \alpha_c)}{dH} = \frac{(1 - \alpha_c) H \cdot \rho}{i \cdot D \cdot M} \quad (5)$$

$$t_c = \frac{n_c \cdot L}{v} = \frac{(1 - \alpha_c) H \cdot \rho \cdot L}{i \cdot D \cdot M \cdot v} \quad (6)$$

$L$  : 履帯全長 (m)     $v$  : 履帯周速度 (m/h)

ところで、単位摩耗量  $M$  は式(1)より接地圧  $p$  の関数となるので、ゴムグラウサに作用している接地圧を決定する必要がある。履帯は懸架構造の違いから剛性履帯とたわみ性履帯に分けられ、接地圧分布が異なる。剛性履帯の場合、接地圧は均一に分布するとみなすと、グラウサ頂面に作用する接地圧  $p$  (MPa) は次式で与えられる。

$$p = \frac{W}{2a_1 \cdot B \cdot D} \quad (7)$$

$W$  : 車両重量 (kN)     $B$  : 履帯幅 (m)

上式の真接地面積比  $a_1$  は、次式で表される。

$$a_1 = \frac{A_r \cdot G_n}{B \cdot D} \quad (8)$$

$A_r$  : 1 グ라우サ頂面積 (m<sup>2</sup>) (=  $C \cdot B$ )

$G_n$  : 接地グラウサ数 (片側履帯)

たわみ性履帯の場合、転輪分担荷重  $W'$  (kN) が 1 個のグラウサに作用すると仮定する。

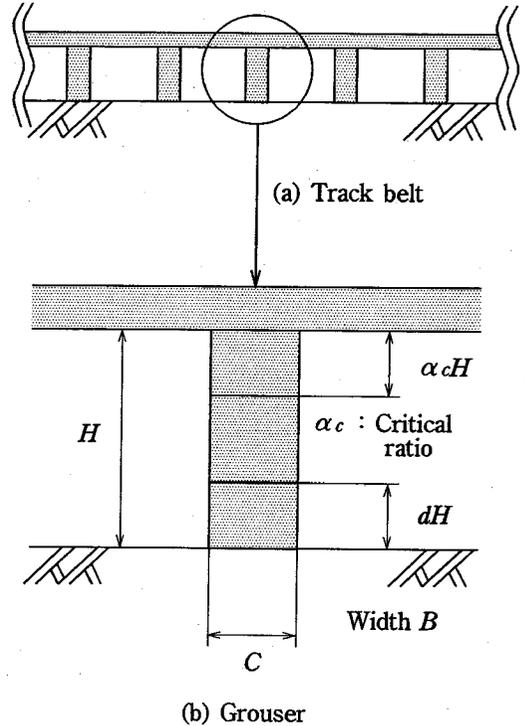


Fig.12 Wear height  $dH$  of a grouser of track belt

$$p = \frac{W'}{A_r} = \frac{G_n \cdot W'}{a_1 \cdot B \cdot D} \quad (9)$$

この解析のフローチャートを Fig.13 に示す。入力データはグラウサ、ブルドーザの諸元およびゴム材、路面の特性である。まずグラウサ、ブルドーザの諸元より接地圧  $p$  を式(7)または(9)で算定する。次に、この  $p$  を式(1)を代入し、当該路面および摩耗に関する雰囲気 (乾燥、水浸) に対する単位摩耗量  $M$  を、予め室内摩耗試験により求めておいた実験定数  $a_0$ 、 $a_1$  を用いて決定する。それからスリップ率  $i$  を与えて、式(5)より限界回転数  $n_c$ 、式(6)より摩耗寿命  $t_c$  を予測することができる。

## (2) 予測例および考察

実機の 40 kN 級ブルドーザを参考にして、Table 6 に示す諸元をもつブルドーザを解析対象として、ゴム履帯の摩耗寿命予測を行った。真接地面積比  $a_1$  は実機と同様に 15% に設定した。実機はたわみ性履帯であるが、比較のため剛性履帯の場合も比較のため計算を行った。さらに、たわみ性履帯では接地圧の影響をみるため  $a_1 = 25\%$  でも計算を行った。たわみ性履帯では  $a_1 = 15$ 、25% のとき  $p = 0.314$ ,

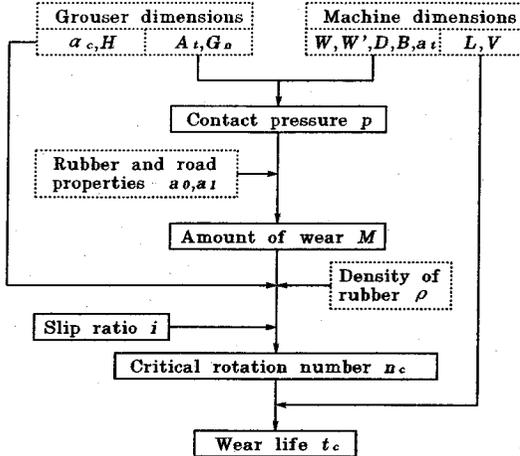


Fig.13 Flow chart to predict the wear life of rubber track belt

Table 6 Dimensions of 40 kN class bulldozer

Gross weight	$W$ (kN)	40
Total length of track belt	$L$ (cm)	500
Contact length of track belt	$D$ (cm)	170
Width of track belt	$B$ (cm)	50
Height of grouser	$H$ (cm)	6.5
Number of contact grousers on one side of track belt	$G_n$	10
Number of rollers on one side of track belt		5
Support load to each roller	$W'$ (kN)	4
Traveling speed of track belt	$V$ (km/h)	2

0.188 MPa, 剛性履帯では  $a_1 = 15\%$  のとき  $p = 0.157$  MPa の接地圧となった。

一例として、モルタル路面におけるゴム供試体 A1 (NR/SBR) に対する計算を行った。このとき、式(1)における実験定数  $a_0$  ( $g/m^2/m$ ),  $a_1$  ( $\mu g/m/N$ ) は、乾燥状態で 14.8, 17.2, 水浸状態で -1.3, 32.3 である。摩耗寿命  $t_c$  とスリップ率  $i$  の関係を Fig.14 に示す。摩耗寿命  $t_c$  は水浸状態で乾燥状態に比べ約 2 倍程度長く、低接地圧ほど向上する。また、式(6)より  $t_c$  はスリップ率  $i$  に反比例するので、 $i = 10\%$  にかけて急激に減少する。乾燥状態における  $i = 40\%$  付近では、わずか  $t_c = 10$  h 強であり、過大なスリップ率が摩耗寿命をいかに短くするものかを表している。しかし、実機のスリップ率は牽引負荷にもよるが、一般に数%のオーダーである。また、ここで  $t_c$  とはブルドーザが実際に押土などの正味の作業時間のことで、建設機械に通常取り付けられているサービスマーターの表示時間(エンジンの稼働時間で、作業していない時間を含む)は当

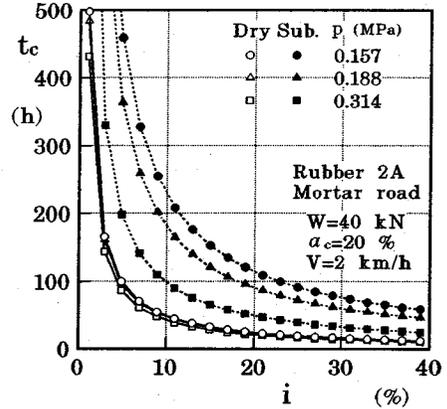


Fig.14 Relation between predicted wear life  $t_c$  and slip ratio  $i$

然ながら  $t_c$  より長い。

解析ではグラウサ縦断面形状を長方形としたが、実機は台形であるので摩耗するにつれて接地圧は低下する。加えてゴム自体の体積も台形の方が大きい。さらに、室内摩耗試験は実機の 2 倍程度の苛酷度を有する<sup>9)</sup> ことも考え合わせると、実機の摩耗寿命は解析結果よりもかなり向上するものと考えられる。

ゴム履帯の摩耗寿命を向上させるには、まずグラウサの頂面積を広くし接地圧を小さくすること、ついでゴムの発熱を抑えるため水などにより冷却することが効果的である。また、牽引負荷に応じてスリップ率は変化する<sup>9)</sup> ので、 $i = 5\%$  以下になるように牽引負荷を抑えることも重要である。

## 6. 結論

砕石路面における履帯用ゴム材の摩耗特性を明らかにするため、代表的な耐摩耗ゴムからなる試験片に対する実験を行った。さらに、ブルドーザ用ゴム履帯の摩耗寿命予測式を提案した。その結果得られた知見を要約して述べる。

- (1) ゴムの摩耗量は接触面圧が高くなるにしたがって直線的に増加する。
- (2) 水浸状態では乾燥状態の摩耗量の半分程度に抑えることができる。
- (3) ゴム硬さ  $H_s$  や引裂強さといったゴム材料の物性の摩耗量に及ぼす影響は、顕著にはみられない。
- (4) イソプレンゴムが耐摩耗性にやや優れている。
- (5) 摩耗量がピークとなる砕石の粒径、ピッチが存在する。
- (6) ゴム供試体の底面と同じ路面波長におけるパワースペクトル密度が摩耗量に関係している。
- (7) 砕石路面におけるゴムの摩耗量は接触面圧の影

響が大きく、次いで摩耗に関する雰囲気（乾燥、水浸）の影響がやや大きく、路面粗さの影響は比較的小さい。

(8) ゴム履帯の摩耗対策として、グラウサ頂面積を広くする、ゴムを冷却する、ならびにスリップ率を5%程度に抑えること等が挙げられる。

以上の通り、碎石路面における履帯用ゴム材の耐摩耗性の評価や摩耗特性の解明はある程度なされたと思うが、もう一つの問題である耐カット性の評価やカット特性の解明についても今後の機会に報告する予定である。

最後に、実験を遂行した愛媛大学元学部生岡崎秀明、神原達二の両氏に謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 田中久一郎：摩擦のおはなし，pp. 157-186，日本規格協会，1985。
- 2) 室達朗，河原莊一郎，高木博人：ホイールローダ用タイヤの摩耗と路面粗さ，昭和61年度建設機械と施工法シンポジウム論文集，pp. 69-72，1986。
- 3) 室達朗：重ダンプトラック用タイヤの摩耗速度特性，テラメカニックス，第7号，pp. 26-32，1987。
- 4) 室達朗，河原莊一郎，河野幸一：ホイールローダ用タイヤの摩耗速度特性，愛媛大学工学部紀要，11巻3号，pp. 395-407，1988。
- 5) 日野幹雄：スペクトル解析，pp. 193-236，朝倉書店，1977。
- 6) 日本ゴム協会編：ゴム試験法<新版>，pp. 337-359，日本ゴム協会，1988。
- 7) 室達朗，榎明潔，亀岡均：岩盤掘削刃の摩耗に及ぼす金属材料と雰囲気の影響，愛媛大学工学部紀要，10巻1号，pp. 281-293，1982。
- 8) 河原莊一郎，室達朗，山崎洋一：ゴム履帯の摩耗特性と摩耗寿命予測，土木学会第45回年次学術講演会講演概要集Ⅲ，pp. 792-793，1990。
- 9) 室達朗，深川良一，河原莊一郎：アスファルト舗装路面上のトラクターの登坂下降時走行性能，土木学会論文集，No. 468/VI-19，pp. 11-20，1993。

(1994. 10. 3 受付)

## WEAR CHARACTERISTICS OF RUBBER MATERIAL AND ITS APPLICATION TO THE PREDICTION OF WEAR LIFE OF TRACK BELT ON ROUGH TERRAIN

Soichiro KAWAHARA, Tatsuro MURO, Ryoichi FUKAGAWA  
and Kazuyoshi TATEYAMA

The characteristics of wear of rubber materials, which are used for track belts of construction machinery, were investigated by some experiments. Eight kinds of rubber specimens were subjected to the wear test, in which the rubber specimens were rubbed on eight kinds of rough terrain and the amount of wear was measured during the experiments. The results of experiments gave us some quantitative knowledge on the relationship between the wear of rubber materials and various factors such as properties of rubber material, contact pressure, roughness of the terrain and the effects of water. A method for predicting a wear life of rubber tracks of construction machinery was discussed, based on the results of the wear tests.