研究

摩耗面における突起生成について (第8報)*

— 摩耗面における突起頂点分布の形成機構 —

鏡 重次郎** 山田国男** 武田信男** 直井貞司***

On the Formation of Asperity on Worn Surfaces (8th Report)

— Mechanism of the Formation of Asperity Height Distribution on Worn Surfaces —

Jujiro KAGAMI, Kunio YAMADA, Nobuo TAKEDA, Teiji NAOI

Mechanism of formation of the asperity height distribution on surfaces in mild and steady wear was theoretically analysed, assuming that the asperities were in elastic contact. Then the investigations were carried out by wear tests with Pylex glass in regard to the theoretical results. The main results were as follows:

(1) The real asperity height distributions that were theoretically calculated were similar to the theoretical ones. Then it was found that both values of the standard deviations of the distributions obtained by the experiment and analysis were increased as the load under which surfaces were in contact was increased.

(2) In this analysis, it was found that positions at which the asperity height distributions had maxima, came into regions in which the asperities were in contact.

1. 緒 言

すべり面を有する機械要素の多くは、引っかき摩耗あるいは過酷な摩耗ではなく、マイルドな摩耗を伴うような条件下で用いられる場合が多い。筆者らは、このような摩耗現象を究明するため、突起先端部が球形をなすものとして接触面形状の解析を行い、さらに各突起は弾性的に接触するという条件のもとに接触機構の解析をし、実験的検討を行った^{1)~3)}。さらに、突起破壊を疲れ現象とし、突起頂点分布が一様分布をなすものとして摩耗量 V について解析を行い、次の式を導入した⁴⁾。

$$V = C_i WL \frac{T_0 + C_s v}{v} \exp \left\{ - \frac{\Delta f^*}{C_0(T_0 + C_s v)} \right\} \quad (1)$$

ただし、 W は荷重、 L はすべり距離、 T_0 は室温、 v はすべり速度、 Δf^* は活性化エネルギーであり、 C_i 、 C_s および C_0 は種々の要素を含む定数である。

定常摩耗において、相接する二つの摩耗面のうち、一つの面に存在する各突起は式 (1) に相当する速さで他方の面に向かって近づいてゆく過程において、破壊、生成を繰返して摩耗面形状

が形成される。本報では、摩耗面での突起の破壊寿命と生成過程を考え、突起頂点分布の形成機構について解析を行った。さらに、パイレックスガラスを試料として用い、実験的検討を行った経過について述べる。

2. 理論解析

理論解析をする上で次の仮定をする。突起先端部はすべて等しい半径 R の球形とし、それらは互いに弾性的に接触するものとする。また、摩耗過程は定常状態にあるものとする。

図1に示すように、二つの面1, 2が荷重 W で押付けられ接触面に平行な方向に v なる速度で相対すべり運動をしているものとする。さらに、これら二つの面は互い

図1 摩耗による真実突起頂点分布の形成

* 原稿受付 昭和51年7月29日。昭和50年度精密機学会春季大会学術講演会(昭和50年4月4日)にて発表。

** 正会員 宇都宮大学工学部(宇都宮市石井町2753)

*** 宇都宮大学工学部

図2 運動する突起の接触

に接触面に直角をなす方向に V_a, V_a' の速度でそれぞれ摩耗するものとする。互いの面の真実突起頂点分布を $f_1(z), f_2(z)$ とし、食込み量を z_a とする。ただし、 z 座標は面2の最大突起頂点位置を原点 O とし、接触面に直交する方向にとる。ここでは、面2の頂点分布 $f_2(z)$ を変化しないものとし、この面に対して V_a の速度で食込んでゆく過程で形成される面1の突起頂点分布 $f_1(z)$ を解析的に求めることを考える。

2.1 突起の破壊機構

2.1.1 突起の平均接触時間 ω および接触の周期 τ_m

図1において、面1の任意の突起が $O \sim z_a$ 間で破壊し、 $z = z''$ の位置に新しい突起として再生するものとする。次に、この突起が V_a の速度で z の正方向に進み $z = z'''$ に達する。さらに、その位置から微小距離 dz''' だけ進むとき、 $z'(\leq z''') \sim z' + dz'$ 区間に存在する面2の突起との平均接触時間について考える。

いま図2に示すように、食込み量 $h = z''' - z'$ が突起先端部半径 R より十分小さいとき、有効接触半径 e は、

$$e_1 \approx R_1(2h/R_1)^{1/2}, \quad e_2 \approx R_2(2h/R_1)^{1/2} \quad (R_1 = R_1 + R_2) \quad (2)$$

となる。これより、平均接触時間 $\omega(z''', z')$ は、

$$\begin{aligned} \omega(z''', z') &= (\pi/2v) \cdot (e_1 + e_2) \\ &= (\pi/2v) \cdot \{2R_1(z''' - z')\}^{1/2} \end{aligned} \quad (3)$$

となる。

さらに、 $z = z'''$ に位置する面1の突起が、 $z = z'$ に $n_0 f_2(z') dz'$ なる面密度で分布する面2の突起群の中を v の速度で直進するとき、平均の接触周期は次のように表される。ただし、 n_0 は突起面密度である。

$$\begin{aligned} \tau_m(z''', z') &= \frac{1}{2(e_1 + e_2)n_0 f_2(z') dz' v} \\ &= \frac{1}{2n_0 v \{R_1(z''' - z')\}^{1/2} f_2(z') dz'} \end{aligned} \quad (4)$$

2.1.2 突起破壊の誘因となる応力 σ_s

図1において、 $z = z'''$, $z = z'$ に頂点を有するそれぞれ

面1, 2上の突起が、食込み量 $h = z''' - z'$ 、干渉量 Δh で互いに接触するとき、平均接触圧力 p_m は次のようになる。

$$p_m = \frac{4E'}{3\pi} \left(\frac{\Delta h}{R} \right)^{1/2} \quad (5)$$

ただし、 E を縦弾性係数として $E' \approx E_1 E_2 / (E_1 + E_2)$, $\bar{R} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$ である。さらに、突起が $\Delta h = 0$ で接するときの両突起の中心軸間距離を r_0 とすれば、 p_m の平均値 $\bar{p}_m$ は次のように表される。

$$\begin{aligned} \bar{p}_m &= \frac{1}{\pi r_0^2} \int_0^{r_0} p_m \cdot 2\pi r dr \\ &= \frac{8E'}{9\pi} \left(\frac{h}{R} \right)^{1/2} \end{aligned} \quad (6)$$

k_s を定数として、突起破壊の誘因となる応力 $\sigma_s(z''', z')$ を次のように表す⁶⁾。

$$\sigma_s(z''', z') = k_s \cdot \frac{8E'}{9\pi} \cdot \left(\frac{z''' - z'}{R} \right)^{1/2} \quad (7)$$

2.1.3 接触点温度 θ_z

接触点温度を θ_z とするとき、 θ_z は室温 θ_0 、接触点で発生した熱量による温度上昇 θ_{fz} 、および接触面の平均温度上昇 θ_m の和として次のように表される⁶⁾。

$$\theta_z = \theta_0 + \theta_{fz} + \theta_m \quad (8)$$

ここで、 θ_{fz} は次のように表される。

$$\theta_{fz} = (\pi a / 4K) \cdot q$$

a は接触点半径、 K は熱伝導率、さらに q は単位接触面積あたりの発熱量である。 $z = z'''$ に頂点を有する面1の突起が、 $O \sim z'''$ 区間に存在する面2の突起と接触するときの接触点半径 a は、 $f_2(z)$ がレイリー分布に従う³⁾ とき解析的に次のように表される。

$$a \approx \frac{2.95}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\bar{R}^{1/2}}{\sigma_2^{1/7}} z'''^{9/14} \quad (9)$$

s を接触部のせん断強さとするとき、 $q = sv/2J$ (J : 熱の仕事当量) なることから、接触点温度 $T_z (= 273 + \theta_z)$ は、

$$T_z = T_0 + C_{fz} v z'''^{9/14} + r_i C_m W v, \quad (T_0 = 273 + \theta_0) \quad (8')$$

となる。ただし、諸記号は次のように表される。

$$C_{fz} = \frac{\pi s \bar{R}^{1/2}}{3.84 K J \sigma_2^{1/7}}$$

$$C_m = \frac{\mu}{2\pi J r (2\alpha_s K r)^{1/2}}$$

ここで、 r : ビン試料半径、 α_s : 表面伝熱率、 r_i : 試料保持具からの熱量の流出係数、 μ : 摩擦係数。

2.1.4 突起の単位時間あたり破壊を起こす確率 m_z

温度 T_z 、応力 σ_s のもとで突起が単位時間あたり破壊を起こす確率 m_z は次のように表される⁷⁾。

$$m_z = (Z_e k T_z / h) \cdot \exp(-\Delta f^* / C_0 T_0) \cdot \exp(\alpha \cdot k_s \alpha_s) \quad (10)$$

ただし、 α は定数、 Z_e は核発生源総数である。

2.1.5 面1の摩耗速度 V_a

ここでは、面1の摩耗速度 V_a を第5報⁴⁾で導入した式(11)を用いて表すことにする。式(1)を単位時間に摩耗する深さ V_a に直すと次のようになる。

$$V_a = C_d A_s \cdot \exp(\alpha \cdot k_e \cdot \sigma) \quad (11)$$

ただし、諸記号は次のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} C_d &= 1.25 \bar{R} W / A_a E' \\ A_s &= (Z k T_s / h) \cdot \exp(-\Delta f^* / C_0 T_s) \\ T_s &= T_0 + C_f W^{1/6} v + r_i C_m W v \\ \sigma &= 0.42 E' (\sigma_2 / \bar{R})^{1/2} \\ C_f &= \frac{\mu}{8 J K} \cdot \left(\frac{E'^5}{A_a n_{01} n_{02}} \right)^{1/6} \cdot \left(\frac{\sigma_2^7}{R_1 R_2 R_t} \right)^{1/12} \\ C_m &= \frac{\mu}{2\pi J r (2\alpha_s K r)^{1/2}} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

なお、式(11)は突起頂点の高さがすべて等しいという条件のもとに導かれたものであり⁴⁾、それゆえ上式中の σ 、 Z 、 T_s は、それぞれ式(7)の σ_s 、式(10)の Z_e 、式(8)'の T_z と等価なものである。

2.1.6 突起の非破壊確率 P

図1において、 $z = z'''$ に頂点を有する面1の突起が、 dt 時間後に dz''' だけ面2に向かって進む間に、 $z' \sim z' + dz'$ 区間に在る面2の突起と接触する回数を dN 、さらにそのときの単位接触回数につき破壊の起こる確率を μ_n とすれば、

$$\mu_n dN = m_z dt \omega / \tau_m \quad (13)$$

となる⁸⁾。ここで、 $V_a dt = dz'''$ より $\mu_n dN$ は次のようになる。

$$\mu_n dN = (m_z / V_a) \cdot (\omega / \tau_m) dz''' \quad (13')$$

面1上で $z = z''$ に生成した突起が、 $z = z'''$ に達してもなお破壊しないでいる確率は、これを非破壊確率 $P(z''', z'')$ とすれば、式(3)、式(4)、式(7)、式(8)、式(10)、式(11)および式(13)より次のようになる。

$$P(z''', z'') = \exp \left\{ - \int_{z''}^{z'''} M(z''', z') dz' dz''' \right\} \quad (14)$$

$$M(z''', z') = (2\pi R_1 n_{02} / V_a) \cdot (z''' - z'') f_2(z') m_z$$

ここで、突起破壊分布の確率密度関数 $q(z''', z'')$ は次のようになる。

$$q(z''', z'') = - \frac{\partial P(z''', z'')}{\partial z'''} \quad (15)$$

2.2 突起生成機構と真実突起頂点分布 $f_1(z)$ の形成

2.2.1 突起の生成機構

面1の各突起は V_a の速度で面2に向かって進む過程で、式(15)で表される破壊特性をもって破壊し、もとの位置より低い位置に新しい突起として生成するものとす

図3 突起再生分布 $T(z, z''')$

る。ここで、 $z = z''$ の位置で z の単位長さ移動する間に、単位長さ、単位面積あたり生成される突起数を考え、これを突起生成速度関数と定義する。

まず初めに、図3において $z = 0$ に dz''' の微小区間を考えると、この区間に頂点を有する面1の突起数は $A_a n_{01} f_1(0) dz'''$ となる。次に、これらの突起が $z = z'''$ まで進み、さらに dz''' だけ進む間に破壊する突起数は $A_a n_{01} f_1(0) dz''' q(z''', 0) dz'''$ となる。これらの突起は、図3に示すように $z = z(\leq z''')$ の位置に微小区間 dz を考えると、この区間に $T(z, z''') dz$ の確率で再生するものとする。この $T(z, z''')$ を突起再生分布の確率密度関数と定義する。この dz 区間に再生する突起数が $A_a dz dz''' \Delta \phi_1(z)$ に等しいとして、

$$A_a dz dz''' \Delta \phi_1(z) = A_a n_{01} f_1(0) dz''' q(z''', 0) dz''' \times T(z, z''') dz$$

となる。これより $\phi_1(z)$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} \phi_1(z) &= \int_0^\infty \Delta \phi_1(z) \\ &= n_{01} f_1(0) \int_0^\infty q(z''', 0) T(z, z''') dz''' \end{aligned} \quad (16)$$

ここで、 $\phi_1(z)$ は面1の突起のうち $z = -dz''' \sim 0$ の区間に存在する $A_a n_{01} f_1(0)$ なる突起の破壊によって生成される成分を表し、添字1を付けて第1次突起生成速度関数と定義する。

次に同じようにして、 $\phi_1(z)$ で生成される突起のうち、 $z'' \sim z'' + dz''$ 区間に生成されるものが $z = z'''$ に達し、式(15)に従って破壊され、 $z \sim z + dz$ の区間に $T(z, z''') dz$ の確率で生成されるものとして、第2次突起生成速度関数が導入される。以下同じようにして、第 n 次突起生成速度関数 $\phi_n(z)$ は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \phi_n(z) &= \int_0^\infty \int_{z''}^\infty \phi_{n-1}(z''') q(z''', z'') T(z, z''') \\ &\quad \times dz''' dz'', \quad (z \leq 0) \\ &= \int_z^\infty \int_{z''}^\infty \phi_{n-1}(z''') q(z''', z'') T(z, z''') \\ &\quad \times dz''' dz'', \quad (0 < z \leq z'') \\ &= \int_0^\infty \int_z^\infty \phi_{n-1}(z''') q(z''', z'') T(z, z''') \\ &\quad \times dz''' dz'', \quad (z > z'') \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

一般に, $\phi_1 > \phi_2 > \phi_3 > \dots$ となり, $\phi(z)$ は次のようになる.

$$\phi(z) = \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i(z) \quad (18)$$

2.2.2 突起頂点分布 $f_1(z)$

図3に示す座標の各位置で式(18)で表される特性をもつて新しい突起が生成される. 生成される突起のうち, $z \leq 0$ の領域では面2の突起と接触しないため破壊は起こらず, 生成突起のすべてを累積したものが頂点分布を形成する.

$$f_1(z) = \frac{1}{n_{01}} \int_{-\infty}^z \phi(z) dz, \quad (z \leq 0) \quad (19)$$

しかし, $z > 0$ では式(18)で表される生成のほかに式(15)に従って破壊するものもある. そこで, この領域では破壊せずに残留するものの和が $f_1(z)$ を形成することになる. $\phi_1(z)$ の場合と同様に, $-dz \sim 0$ の区間に存在する面1の突起 $A_0 n_{01} f_1(0) dz$ のうち, $z = z$ に達してもなお破壊しないで残留するものを $R_1(z) dz$ で表し, $R_1(z)$ を第1次突起残留関数と定義する.

$$R_1(z) = A_0 n_{01} f_1(0) P(z, 0) \quad (20)$$

次に, $\phi_1(z)$ で $z'' \sim z'' + dz''$ 区間に生成する突起のうち, $z = z$ まで残留するものを $R_2(z) dz$ と表す. 同様に第 n 次の突起残留関数 $R_n(z)$ は次のようになる.

$$R_n(z) = A_0 \int_0^z \phi_n(z'') P(z, z'') dz'', \quad (n \geq 2) \quad (21)$$

一般に, $R_1 > R_2 > R_3 > \dots$ となり, $R(z)$ は次のようになる.

$$R(z) = \sum_{i=1}^{\infty} R_i(z) \quad (22)$$

これより, $f_1(z)$ は次のようになる.

$$f_1(z) = \frac{1}{A_0 n_{01}} \sum_{i=1}^{\infty} R_i(z), \quad (z > 0) \quad (23)$$

式(19)及び式(23)により, 面1の真実突起頂点分布 $f_1(z)$ が求められる.

図4 摩擦実験装置

3. 実験的考察

3.1 実験装置および実験条件

実験装置の概要を図4に示す. ピン対リング形式を用い, リング試料を回転してその端面にピン試料を所定の荷重で押付ける. 摩擦力は試料支持腕にはったストレンゲージで検出して測定した.

試料としてパイレックスガラスを用い, その諸性質は第3報³⁾で述べたとおりである. 接触面は #320 C 砥粒でラッピング仕上して実験に用いた.

すべり速度は 11.7 mm/s で一定にした. 荷重は 0.94 ~ 1.49 kg の範囲で6種類用い, それぞれの荷重条件で 40~50 h 摩擦実験を行った. 回転するリング面には絶えずガーゼを押付け, 摩擦粉が再び接触面に混入するのを防ぎながら実験した.

3.2 実験結果および考察

3.2.1 摩擦面形状

約3hおきに摩擦量を天びんで測定し, 累積摩擦曲線を求めた. その結果本実験では, 初めの15~25hは初期摩擦を示し, その後累積摩擦曲線は直線状になり定常摩擦になることが認められた. 図5に荷重 $W = 1.29$ kg のピン試料の例を示す.

定常摩擦になった後にピン, リング試料表面の粗さ曲線を求めた. 摩擦面は方向性のある粗さになるため, 第2報²⁾で述べたように, まずすべり方向とこれに直交する方向に粗さ曲線を記録し, これよりそれぞれ突起先端部半径の平均値 $R_m(0^\circ)$, $R_m(90^\circ)$ を求めた. 次にこの方向性のある粗さ面に存在する各突起を等価な球形突起に置換えるため, すべり方向に対して $u_0 = \tan^{-1}\{R_m(90^\circ)/R_m(0^\circ)\}^{1/4}$ なる方向²⁾に粗さ曲線を記録した. これより, 突起先端部半径 R , 最大高さ粗さ R_{max} を求めた. 以上の諸量を表1に示す. さらに, 同粗さ曲線より触針

図5 摩耗進行曲線

表1 摩耗面の諸量

(L_s=3.2 mm)

荷重 W(kg)	試料	R _m (0°) (μm)	R _m (90°) (μm)	u _e (deg)	R (実測値) (μm)	R _{max} (μm)
0.94	ピン	65	20	36	37	2.3
	リング	84	27	37	38	3.1
1.04	ピン	71	20	36	35	2.8
	リング	82	24	36	37	2.9
1.14	ピン	65	27	39	39	3.1
	リング	76	21	36	32	4.6
1.29	ピン	80	17	34	35	3.4
	リング	68	22	37	39	4.8
1.39	ピン	84	24	36	31	5.4
	リング	77	29	38	35	5.1
1.49	ピン	75	22	32	31	5.3
	リング	82	18	35	38	5.6

表2 摩耗面の諸量と摩擦係数

(L_s=3.2 mm)

荷重 W(kg)	試料	N	a _e (μm)	突起面 密度 n ₀ (mm ⁻²)	H(h _e) の σ _{h_e} (μm)	g(z) の σ _g (μm)	f(z) の σ _f (μm)	摩擦 係数
0.94	ピン	92	7.5	1900	0.38	0.56	0.35	0.75
	リング	84	7.4	1800	0.37	0.50	0.32	
1.04	ピン	90	6.7	2100	0.40	0.40	0.33	0.88
	リング	77	6.7	1800	0.35	0.58	0.37	
1.14	ピン	93	7.3	2000	0.28	0.50	0.40	0.83
	リング	108	7.3	2300	0.31	0.54	0.43	
1.29	ピン	89	7.0	2000	0.37	0.64	0.44	0.81
	リング	94	7.2	2000	0.35	0.60	0.45	
1.39	ピン	81	5.8	2200	0.39	0.63	0.43	0.77
	リング	95	7.1	2000	0.30	0.67	0.45	
1.49	ピン	96	6.6	2300	0.37	0.60	0.44	0.86
	リング	90	7.3	1900	0.36	0.59	0.44

図6 真実突起頂点分布の計算のためのフローチャート

走査距離 l_s 内に含まれる突起頂点の数 N , 突起底面の平均有効半径 $\bar{a}_e$ を求め, $n_0 = N/2\bar{a}_e l_s$ なる関係²⁾ を用いて突起面密度 n_0 を算出した. さらにまた, 突起有効高さ h_e の高さの分布 $H(h_e)$ の標準偏差値 σ_{h_e} , 粗さ曲線上に現れる突起頂点分布 $g(z)$ の標準偏差値 σ_g を求めた. この $g(z)$ なる分布は, 触針が必ずしも突起頂点を走査するとは限られないため, $g(z)$ より次式²⁾ を用いて真の突起頂点分布 $f(z)$ (これを真実突起頂点分布と定義する) を求めた. ただし, $g(z)$, $H(h_e)$ についてはレイリー分布を用いた³⁾.

$$g(z) \cdot q(z) = C_0 \int_0^z \left\{ f(z') \int_{z-z'}^{\infty} H(h_e) dh_e \right\} dz'$$

ただし, C_0 は定数であり, $q(z) = \bar{a}_e \{z(2R-z)\}^{1/2} / (R-z)$ である. 各摩耗面について求めた以上の諸量を表2

に示す.

3.2.2 真実突起頂点分布 $f_1(z)$ の計算

ピン, リング試料表面をそれぞれ面1, 2とする. 表1および表2に示した面2の形状の諸量, さらに $v=11.7$ mm/s, $A_e=18.1$ mm² (見かけの接触面積), $E' \approx 3340$ kg/mm², $K=0.0934$ cal/mm²·°C·s, $\alpha_s=0.001$ cal/cm²·s·°C, $\Delta f^*=20000$ cal/mol, $s=120$ kg/mm² などの値³⁾ を用い, 図6に示すフローチャートに従い面1なるピン試料表面の真実突起頂点分布 $f_1(z)$ を計算機(東北大学大形計算機 センター NEAC-2200 モデル700)を用いて求めた. 面2の真実突起頂点分布 $f_2(z)$ および突起再生分布 $T(z, z''')$ はともに次のレイリー分布として計算した.

図7 突起の非破壊確率

図8 突起生成速度関係

$$\left. \begin{aligned} f_2(z) &= \frac{z}{k'^2 \sigma_2^2} \cdot \exp\left(-\frac{z^2}{2k'^2 \sigma_2^2}\right), \quad (z \geq 0) \\ &= 0, \quad (z < 0) \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

$$\left. \begin{aligned} T(z, z''') &= \frac{z''' - z}{k'^2 \sigma_r^2} \cdot \exp\left[-\frac{(z''' - z)^2}{2k'^2 \sigma_r^2}\right], \quad (z \geq 0) \\ &= 0, \quad (z < 0) \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

$$k' = \{2/(4 - \pi)\}^{1/2}$$

なお、 $T(z, z''')$ の標準偏差値 σ_r は、図6に示すように、計算される $f_1(z)$ と実測の $f_2(z)$ によって求められる荷重 W_i が、用いた荷重 W に等しくなる条件のもとに求めた。

$W = 1.29$ kgの場合を例にとり、 $f_1(z)$ の形成過程について述べる。まず、図1で $z = z''$ に生成した突起が $z = z'''$ に達してもなお破壊しないでいる確率(非破壊確率) $P(z''', z'')$ を、式(14)により求めた結果図7のようになった。同図は、 $z'' = 0, 0.57, 0.71$ μmの各場合を例にとって示したものである。

図9 突起残留関数

図10 真実突起頂点分布

次に図6のフローチャートに従い、突起生成速度関数を式(16)、式(17)および式(18)により求めた。 $\phi_1(z), \phi_3(z), \phi_5(z)$ および $\phi(z)$ を例にとり図8に示す。なお同図の結果は、式(24)、式(25)の σ_2, σ_r をそれぞれ0.44, 0.55 μmとして計算したものである。また、同じ荷重の場合について、式(20)、式(21)および式(22)により突起残留関数を求めた。 $R_1(z), R_3(z), R_5(z)$ および $R(z)$ を例にとり図9に示す。

最後に、 $\phi(z), R(z)$ を用いて式(19)、式(23)により、面1の真実突起頂点分布を求めた結果を図10に示す。 $f_1(z)$ のうち破線が計算値であり実線は実測値である。

3.2.3 考 察

計算によって求められる $f_1(z)$ は、いずれの荷重条件の場合も図10に示すように実測値に近い値になった。各荷重条件の場合について、計算された $f_1(z)$ の標準偏差値 σ_1 の値を図11に白丸印で示す。黒丸印の値は実測

図 11 荷重 W と真実突起頂点分布 $f_1(z)$ の標準偏差 σ_1 の関係 図 12 荷重と σ_r の関係

値を示している。これより、 W が大きくなると σ_1 も大きくなる傾向が見られ、計算値の σ_1 も実測値に近い値になっていることがわかる。

本研究で取扱った定常摩耗の場合、形成される真実突起頂点分布 $f_1(z)$ は、例えば図 10 に示すようにその最大値を示す位置は相手面との食込み量 z_0 内領域に存在することが解析的に明らかになった。またこのことは、本研究で用いたいずれの荷重条件の場合も認められた。これは、 $z \leq 0$ の領域では相手面突起との接触が起こらないため、生成した突起の累積がそのまま頂点分布を形成し、それゆえ式 (19) の $f_1(z)$ は z の増加とともに増加することになり、最大値を示す位置は突起の破壊と生成の混在する $z > 0$ なる領域、すなわち食込み量内領域に存在することから明らかである。それゆえ、式 (23) の $f_1(z)$ が必ず最大値をもつことになる。

図 6 に示すフローチャートに従い $f_1(z)$ を求める際に得られる突起再生分布の標準偏差値 σ_r と荷重 W の関係

を図 12 に示す。これより、 σ_r の値は σ の値に近いものとなり、さらに荷重 W が大きくなると σ_r も大きくなることがわかる。ここで、突起再生分布 $T(z, z''')$ は、突起頂点が $z=z$ で破壊し元の位置より低い $z=z'''$ の位置になるとき、破壊前後の頂点位置の距離 $z-z'''$ の大きさの分布を表すことから、この分布の標準偏差値 σ_r は $z-z'''$ 、つまり摩耗粉の大きさの分布の標準偏差を表している。

4. 結 言

マイルドな定常摩耗における突起頂点分布の形成機構について、突起は互いに弾性的に接触するという条件のもとに解析を行い、さらにパイレックスガラスを試料として実験的検討をし、次のような結果を得た。

- (1) 理論計算によるものと、実験的に求めた真実突起頂点分布の形はほぼ同じになった。また、荷重が大きくなると頂点分布の標準偏差値も大きくなることが実験的に認められたが、理論計算による標準偏差値も同様の傾向となった。
- (2) 定常摩耗では、突起頂点分布の最大値を示す位置は、互いの面の突起が接触を起こす食込み量内領域にあることが明らかになった。

終わりに、本研究を行うにあたり、種々貴重なご意見をいただいた佐藤健児先生、東北大学工学部・松井正己教授に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 鏡 重次郎, 山田国男, 武田信男, 直井貞司: 摩耗面における突起生成について (第 1 報), 精密機械, **40**, 5 (1974) 396.
- 2) 鏡 重次郎, 山田国男, 武田信男, 直井貞司: 摩耗面における突起生成について (第 2 報), 精密機械, **40**, 8 (1974) 672.
- 3) 鏡 重次郎, 山田国男, 武田信男, 直井貞司: 摩耗面における突起生成について (第 3 報), 精密機械, **40**, 12 (1974) 1067.
- 4) 鏡 重次郎, 山田国男, 武田信男, 直井貞司: 摩耗面における突起生成について (第 5 報), 精密機械, **42**, 3 (1976) 191.
- 5) S. Timoshenko & L. N. Goodier: Theory of Elasticity, McGraw-Hill, New York, (1951) 376.
- 6) 佐田登志夫: 金属の摩耗現象における温度効果, 科研報告, **30**, 4 (1954) 8.
- 7) T. Yokobori: Delayed Fracture in Creep of Copper, J. Phys. Soc. Japan, **6**, (1951) 78.
- 8) T. Yokobori: The Theory of Fatigue Fracture of Metals, J. Phys. Soc. Japan, **10**, 5, (1955) 368.