

トランケート面の表面性状評価法に関する研究

野々垣 稔 田中 幸雄*

Study on Surface Topography Evaluation Method of Truncated Surfaces

Minoru NONOGAKI and Yukio TANAKA

As for sliding contact surfaces, the truncated surface generated in the running-in process has superior performance of sliding contact properties such as anti-scuffing. Several surface topography evaluation methods for such truncated surfaces have been proposed. The purpose of this paper is to find out the characteristics, advantages and disadvantages of each surface topography evaluation methods. We considered the correlation between the parameters in each of the evaluation methods and the applicable surfaces to each of the evaluation methods. As a result, as for the evaluation method by truncation model based on the normal distribution and the JIS B 0671-3 surface topography evaluation method, there exists a correlation in each of the parameters. Furthermore, it has been found that there exists a difference in the applicable surfaces to each of the evaluation methods.

1. 緒 言

一般機械の摩擦面では、初期の運転期間中に接触の状態が改善され、以後の運転では動作が滑らかになり、摩擦も小さくなるなどの性能が向上することが知られており、このようなことを総称して“なじみ”という。なじみは運転初期段階でのしゅう動面の表面形状変化による接触状態の改善のほか、摩擦面の材料学的、化学的性状変化などにも関連するが、しゅう動面の表面形状変化による影響が最も大きい。なじみの進行における表面形状変化には、摩擦面のあたりの改善といったマクロな形状変化と、表面粗さの突起先端部だけが削り取られたり塑性変形するミクロな形状変化があり、後者のことをトランケーションと呼ぶ。そして、その面のことをトランケート面という。潤滑面においてあたりの改善やトランケーションが進行すると、流体潤滑での運転領域が運転条件の厳しい側に広がり、さらに、耐焼付き性能の向上が期待できる。したがって、エンジンのシリンダライナなどのしゅう動面においては、最初からなじみが完了した状態、すなわちトランケーションが進行した状態（プラトー構造表面という）の表面機能をもたせることを狙ってプラトーホーニング加工が行われている。

トランケート面におけるトランケーションの度合いを評価する方法として、正規分布に基づくトランケーションモデルによる表面性状評価法が提案されている¹⁾。一方、プラトーホーニング加工面の生産管理を目的に、プラトー構造表面を評価する方法がISO規格において規格化され、さらにJISにおいても翻訳、規格化された^{3),4),5)}。

本研究では、上記のトランケート面の表面性状評価方法、すなわち正規分布に基づくトランケーションモデルによる表面性状評価法とJIS規格のプラトー構造表面の表面性状評価法について、それぞれの表面性状評価法の特徴や長所、短所を見出すことを目的に、各パラメータの関係、各々の表面性状評価法が適用可能な表面について考察した。

2. トランケート面の表面性状評価法

2.1 正規分布に基づくトランケーションモデルによる表面性状評価法

本章では種々のトランケート面の表面性状評価方法について紹介する。野々垣ら¹⁾は、トランケートされた表面の粗さの高さ分布として、図1に示すような正規分布をもつ軟らかい面が別の正規分布の硬い面によって削り

*本校専攻科機械制御工学専攻学生

取られると仮定した King ら²⁾のトランケーションモデルについて検討し、実測の粗さ断面曲線から得られるひずみ度と尖り度を用いて、そのモデルにおける二つのトランケーションパラメータ（頂部の粗さ p 、トランケーションレベル β ）を推定する方法を提案した。そして、その方法により推定された二つのトランケーションパラメータを用いて再構築した粗さの高さの確率分布と実測した表面粗さ高さの確率分布との比較を行って、両者は良く一致することを示し、King らのモデルの実用性を高めた。

このトランケーションモデルにおける摩耗される面の粗さの高さ分布（トランケート面の高さ分布）は、次のように与えられる。ここで、 σ_r と μ_r は摩耗される面の正規分布の標準偏差と平均であり、 σ_t と μ_t はトランケーション関数の正規分布の標準偏差と平均である。

$$\phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_r} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z}{\sigma_r}\right)^2\right] \left[1 - \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_t} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-c}{\sigma_t}\right)^2\right] dz \right] + \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_t} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-c}{\sigma_t}\right)^2\right] \left[1 - \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_r} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z}{\sigma_r}\right)^2\right] dz \right] \quad (1)$$

図2は、摩耗深さに伴うトランケーションレベルを定義するために σ_r で標準化した分布を示す。ここで、被摩耗面の正規分布を単位標準偏差($\sigma_r^* = 1$)として、トランケーション関数の正規分布の単位標準偏差を $\sigma_t^* = \sigma_t/\sigma_r = p$ としている。トランケーションレベル $\beta = 0$ は、摩耗される面を削りはじめる状態を示し、このとき $c = 3(1+p)$ である。 $\beta = 1$ は、トランケーション関数の最高点が摩耗される面の谷底に達した状態を示し、元の分布は残っており、このとき $c = -3(1-p)$ である。トランケーションレベル β は、元の最大高さに対する干渉域の比として次のように定義される。

$$\beta = \frac{3(1+p)-c}{6}, \quad -3(1-p) \leq c \leq 3(1+p) \quad (2)$$

図3は、 $\beta = 0.7$ と 0.5 におけるさまざまな p についてのトランケート面の確率密度関数と $p = 0.1$ と 0.3 におけるさまざまな β に対するトランケート面の確率密度関数を示す。

次に、トランケーションモデルにおいて、実際のトランケート面のトランケーションパラメータを決定する方法について述べる。図4(a)のひずみ度-尖り度線図において、実際のトランケート面の断面曲線から得られるひずみ度 Sk ととがり度 Ku をプロットすることにより p と β の値が決定される。そして、そのトランケーションパラメータからトランケーションモデルの確率密度関

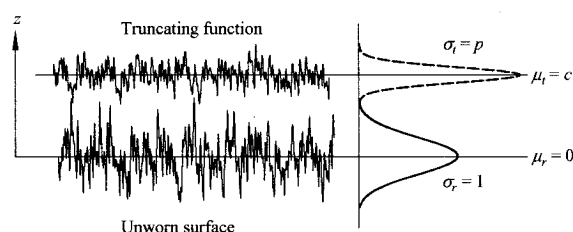
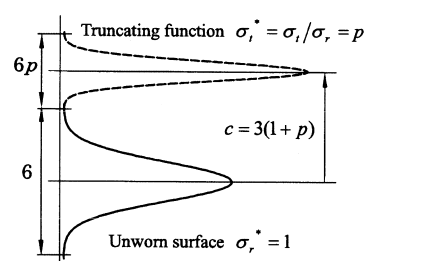
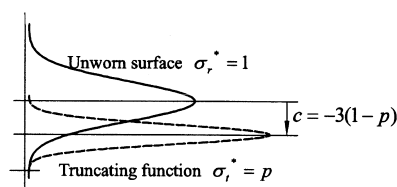


図1 トランケーションモデル

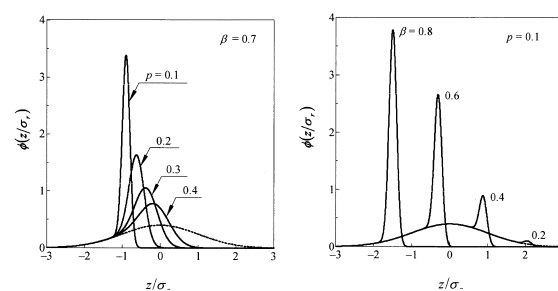


(a) $\beta = 0$



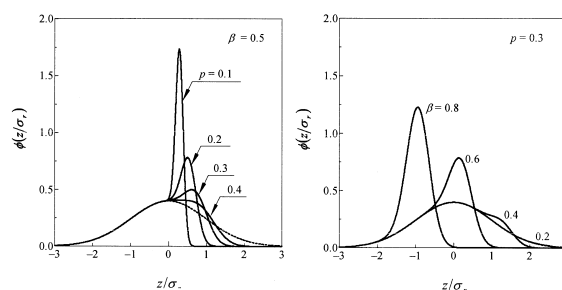
(b) $\beta = 1$

図2 トランケーションレベルの定義



(a) $\beta = 0.7$ での p 変化

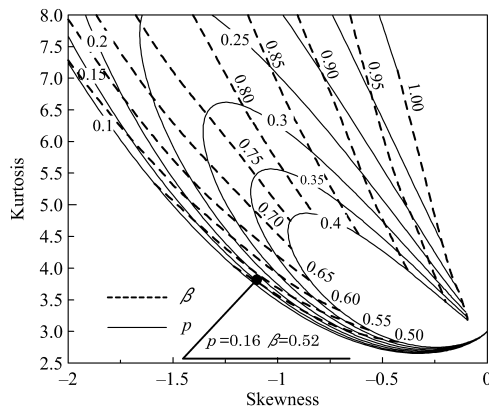
(b) $p = 0.1$ での β 変化



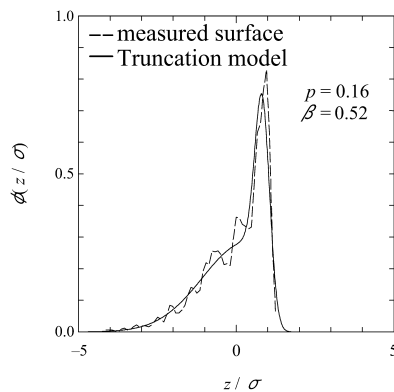
(c) $\beta = 0.5$ での p 変化

(d) $p = 0.3$ での β 変化

図3 トランケートされた表面の確率密度関数



(a) ひずみ度-尖り度線図



(b) 再構築した確率密度関数との比較

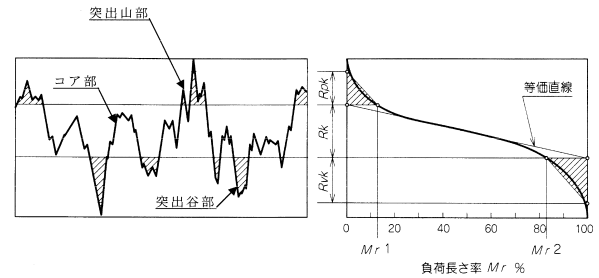
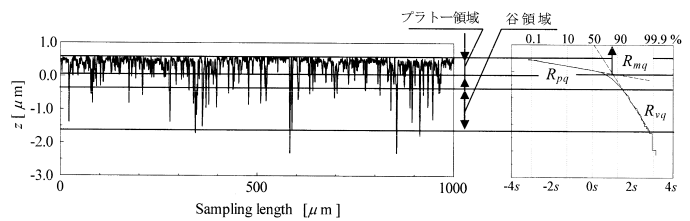
図4 トランケーションパラメータの決定と再構築した確率密度関数

数を生成でき、 $p=0.16$ 、 $\beta=0.52$ のトランケーションモデルの高さ分布（確率密度関数）と実測表面から得た確率密度関数の比較図を図4(b)に示す。この図は、トランケーションモデルによる高さ分布が、実測した表面の高さ分布と一致することを示したものである。ここで、両者の確率密度関数が一致しているときパラメータの同定ができたものとする。

2.2 JIS規格によるトランケート面（プラトー構造表面）の表面性状評価法

2.2.1 線形表現の負荷曲線による高さの特性評価：JISB0671-2 (ISO13565-2)

JIS B 0671-2「線形表現の負荷曲線による高さの特性評価」では、粗さ曲線から算出される負荷曲線を用いて、プラトー構造表面を突出山部、コア部、突出谷部からなる3層構造表面としてモデル化し、この特性をもつ表面を評価するパラメータとして Rpk 、 Rvk 、 Rk 、 $Mr1$ 、 $Mr2$ を規定している。これらパラメータの決定にはまず、図


 図5 線形表現の負荷曲線による高さの特性評価³⁾

 図6 正規確率紙上の負荷曲線による高さの特性評価⁴⁾

5に示すようなS字形状をした負荷曲線に対して等価直線を求める。等価直線は負荷長さの差が40%の2点に対して負荷曲線の割線を引き、最も緩やかとなる位置にある。この等価直線から図5のように各パラメータを求めることができ、これらのパラメータは、 Rpk が気密度、 Rvk が潤滑油の油溜まり、また Rk がしゅう動面として安定して使用できる高さというように表面の機能特性を表している。

2.2.2 正規確率紙上の負荷曲線による高さの特性評価：JISB0671-3 (ISO13565-3)

JIS B 0671-3「正規確率紙上の負荷曲線による高さの特性評価」では、プラトー構造表面のような2つの加工プロセスの痕跡が残っている表面を2層構造表面と定義し、正規確率紙上の負荷曲線から求まるパラメータ Rpq 、 Rvq 、 Rmq を規定している。プラトーホーニング面のように2つの加工プロセスより得られた表面のデータの負荷曲線を正規確率紙上に作図すると、図6のようにプラトー領域と谷領域において、各領域に正規性があれば2つの線形部分によって表される。微細仕上げされたプラトー領域では、傾斜の緩やかな直線、谷領域では比較的急な直線で表される。本規格で定義されているパラメータは、プラトー領域と谷領域、それぞれの直線の傾き Rpq と Rvq 、および2つの直線の交点の負荷長さ率 Rmq である。これらのパラメータはプラトーホーニングのような加工プロセスの条件を示しており、加工プロセスの変化を直接監視することが可能になる。

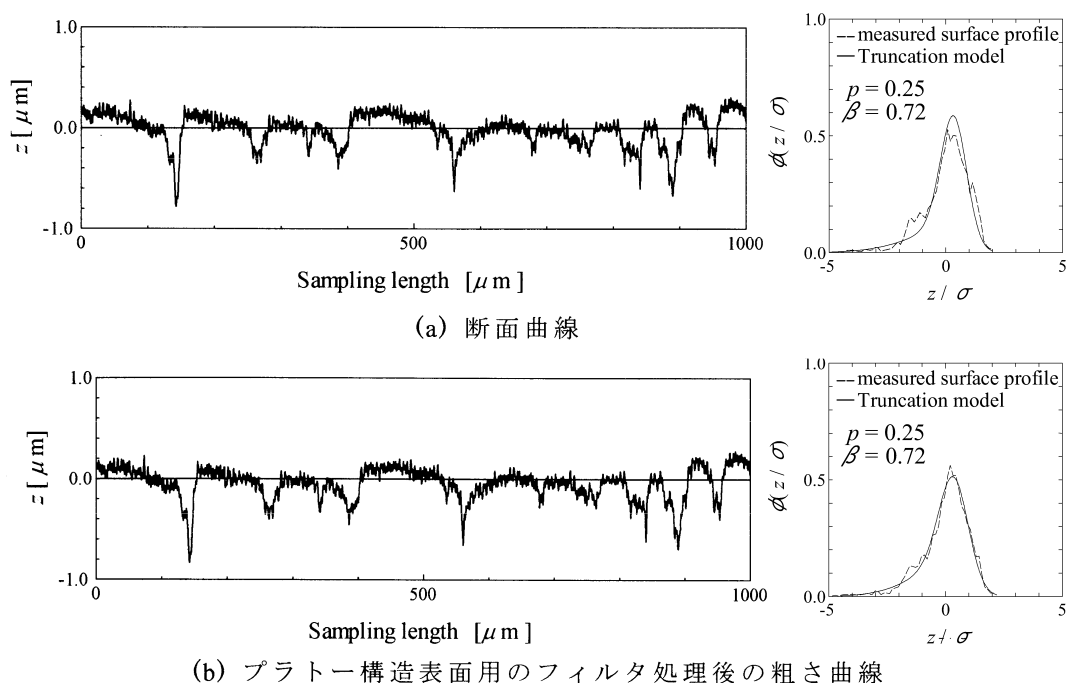


図7 プラトー構造表面用のフィルタ処理の影響

3. 正規分布に基づくトランケーションモデルにおけるプラトー構造表面専用のフィルタ処理の適用

JIS規格のプラトー構造表面の規格では、JISB0671-1で規格化されたプラトー構造専用のフィルタ処理⁵⁾を行って得られた粗さ曲線を用いてパラメータの同定を行う。そこで、正規分布に基づくトランケーションモデルに対してこのプラトー構造専用のフィルタ処理を行ってパラメータの同定を試みた。図7に、断面曲線とプラトー構造表面専用のフィルタ処理後の粗さ曲線および、各曲線から得られる確率密度関数とトランケーションパラメータから再構築した確率密度関数を示す。プラトー構造表面専用のフィルタ処理前は、計測した断面曲線の確率密度関数と得られたトランケーションパラメータで再構築した確率密度関数にずれが生じているが、プラトー構造表面専用のフィルタ処理後は両者の確率密度関数がよく一致していることがわかる。このようにJIS規格のプラトー構造表面専用のフィルタ処理を行うことで正規分布に基づくトランケーションモデルによる表面性状評価法のパラメータの同定の精度が向上した。

4. トランケート面の表面性状評価法の比較

4.1 トランケート面の表面性状評価法の各パラメータの関係

前述したトランケート面の表面性状評価法の各パラメータの関係について考察する。そのために、部分ジャーナル滑り軸受試験機によるなじみ試験⁶⁾から得られた粗さ曲線を用いて、各パラメータを求めた。各表面性状評価法によるパラメータを計算した結果を表1に、トランケートが進行する際の p 、 β 、 Rpq 、 Rmq の変化を図8に示す。表1の(1)～(5)は、図8の横軸と対応しており、

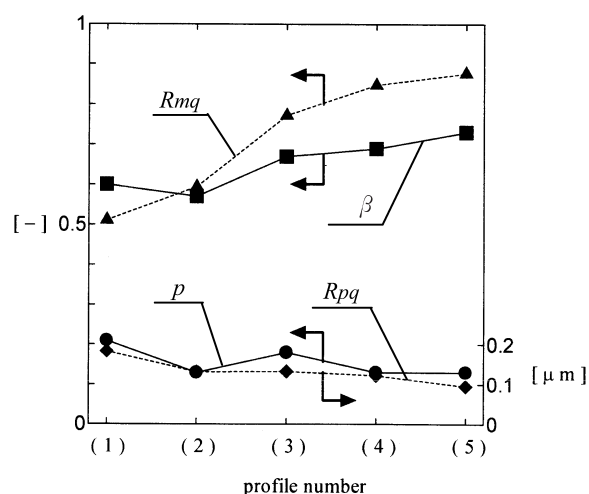
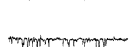
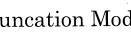


図8 なじみ試験におけるパラメータの変化

表1 なじみ過程における各種表面性状評価法のパラメータ値

profile		R_z [μm]	R_a [μm]	Truncation model		JIS B 0671-3			JIS B 0671-2				
				p	β	R_{pq}	R_{vq}	R_{mq}	R_k	R_{pk}	R_{vk}	$Mr1$	$Mr2$
				[-]	[-]	[μm]	[-]	[-]	[μm]	[μm]	[μm]	[%]	[%]
(0)		3.77	0.55	—	—	—	—	—	1.67	0.50	0.74	6.6	85.1
(1)		2.70	0.35	0.21	0.60	0.18	0.65	0.51	0.64	0.15	0.83	3.7	69.7
(2)		3.02	0.36	0.13	0.57	0.13	0.85	0.59	0.45	0.11	1.07	4.5	66.0
(3)		2.17	0.22	0.18	0.67	0.13	0.73	0.77	0.34	0.14	0.69	7.7	73.2
(4)		2.04	0.15	0.13	0.69	0.12	0.66	0.85	0.24	0.11	0.60	8.0	79.8
(5)		1.60	0.10	0.13	0.73	0.10	0.58	0.88	0.20	0.10	0.42	10.6	83.0

注) Truncation Model：正規分布に基づくトランケーションモデル

(1)から(5)にむけてトランケーションが進行している。JIS B 0671-3規格による表面性状評価法と正規分布に基づくトランケーションモデルによる表面性状評価法のパラメータを比べると、トランケーションが進行するとともに p と R_{pq} は減少、 β と R_{mq} は増加し、 R_{vq} はあまり変化しないことがわかる。また、 p と R_{pq} 、 β と R_{mq} には互いに相関があることもわかる。表1のJIS B 0671-2規格による表面性状評価法の結果をみると、トランケーションが進行するとともに R_{pk} と R_k は減少し、 $Mr1$ は増加している。

粗さ高さの確率密度関数が正規分布に近い表面($Sk = -0.034$, $Ku = 2.91$)の粗さ曲線から得られた確率密度関数と正規確率紙上の負荷曲線を図12に示す。正規分布に基づくトランケーションモデルによる表面性状評価法

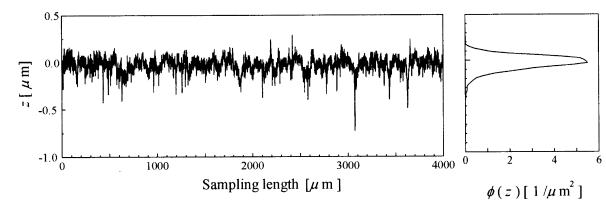


図9 多層構造表面の粗さ曲線

4.2 トランケート面の表面性状評価法が適用できる表面に関する考察

各表面性状評価法が適用可能な表面について調査した結果、表面が多層構造の表面、粗さ高さの確率密度関数が正規分布に近い表面に対して表面性状評価法により特徴が見出された。以下にその例について示す。

多層構造の表面の場合の粗さ曲線を図9に示し、その粗さ曲線から得られた正規確率紙上の負荷曲線と確率密度関数を図10に示す。ここでいう多層構造とはプラトー領域と谷領域の間に存在する不規則な成分の影響が大きい表面のことである。正規分布に基づくトランケーションモデルによる表面性状評価法の2つのパラメータ p 、 β はそれぞれ、 $p = 0.23$ 、 $\beta = 0.84$ とパラメータの同定ができ、再構築した確率密度関数を図10(b)に示す。しかし、JIS規格によるプラトー構造表面の表面性状評価法は図10(a)のように正規確率紙上の負荷曲線が大きな湾曲部を示しており、谷領域の直線部が短い。そのため、パラメータを求めることができない。JIS B 0671-2規格による表面性状評価法では図11のように負荷曲線がS字形をしているのでパラメータを求めることができる。

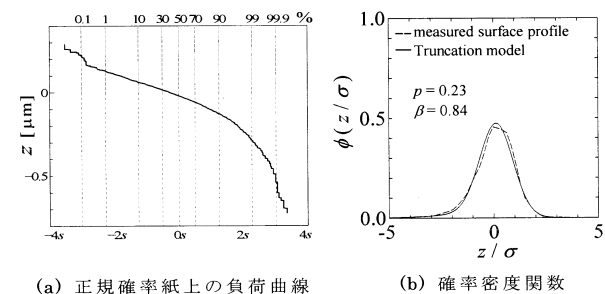


図10 多層構造の表面の場合

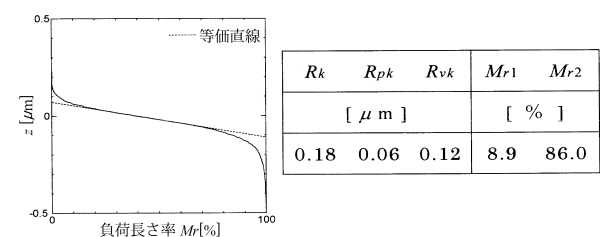


図11 JIS B 0671-2規格による表面性状評価法の計算結果

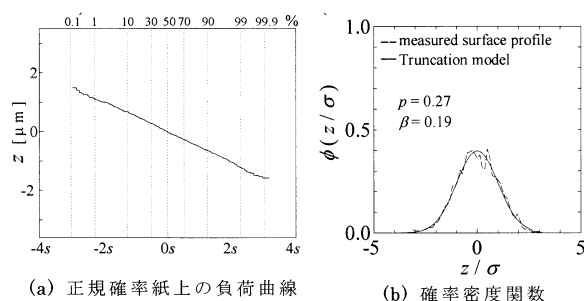


図12 粗さ高さの確率密度関数が正規分布に近い表面の場合 ($Sk = -0.034$, $Ku = 2.91$)

の2つのパラメータ p , β はそれぞれ, $p = 0.27$, $\beta = 0.19$ とパラメータの同定ができ, 再構築した確率密度関数を図12(b)に示す. 一方, JIS規格によるプラトー構造表面の表面性状評価法は図12(a)のように全体が直線になっており, プラトー領域が存在しないため, パラメータを求めることができない. そして, JIS B 0671-2規格による表面性状評価法では図13のように負荷曲線がS字形をしているのでパラメータを求めることができる.

5. 結 言

本研究では, 正規分布に基づくトランケーションモデルによる表面性状評価法と JIS 規格によるプラトー構造表面の表面性状評価法について, それぞれの表面性状評価法の特徴や長所・短所を見出すことを目的に, 各パラメータの関係, 各々の表面性状評価法が適用可能な表面についてなどを考察した. その結果, 以下のような知見が得られた.

- (1) 正規分布に基づくトランケーションモデルによる表面性状評価法において, JIS B 0671-1規格のプラトー構造表面専用のフィルタ処理を行うことでパラメータの同定の精度が向上した.
- (2) JIS B 0671-3規格による表面性状評価法と正規分布に基づくトランケーションモデルによる表面性状評価法のパラメータにおいて, p と Rpq , β と Rmq には互いに相関がある.
- (3) JIS B 0671-3規格による表面性状評価法では, プラトー領域と谷領域の間に存在する不規則な成分の影響が大きい多層構造の表面ではパラメータを決定することができない.

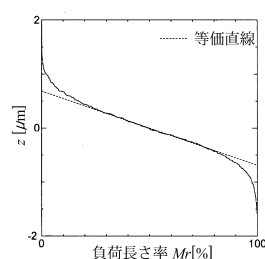


図13 JIS B 0671-2規格による表面性状評価法の計算結果

R_k	R_{pk}	R_{vk}	$Mr1$	$Mr2$
[μm]			[%]	
1.37	0.40	0.49	9.7	91.6

参考文献

- 1) M.Nonogaki, T.Morimoto, T.Nakahara, "Method of determination of truncation parameters from measured surface profile", Tribology International, **36**(2003), pp.745-752.
- 2) King, T.G., Watson, W. and Stout, K. J. "Modeling the micro-geometry of lubricated wear", *Proceedings of the 4th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*, MEP London (1978) , pp.333-343.
- 3) JIS B 0671-2:2002: 製品の幾何特性仕様(GPS)－表面性状：輪郭曲線方式；プラトー構造表面の特性評価－第2部：線形表現の負荷曲線による高さの特性評価
- 4) JIS B 0671-3:2002: 製品の幾何特性仕様(GPS)－表面性状：輪郭曲線方式；プラトー構造表面の特性評価－第3部：正規確率紙上の負荷曲線による高さの特性評価
- 5) JIS B 0671-1:2002: 製品の幾何特性仕様(GPS)－表面性状：輪郭曲線方式；プラトー構造表面の特性評価－第1部：フィルタ処理及び測定条件
- 6) 宮崎裕貴, 大橋 諭, 高田敬士, 野々垣 稔, 中原綱光, ジャーナル滑り軸受の混合潤滑摩擦特性におよぼすトランケーションの影響, (社)日本トライボロジー学会, トライボロジー会議予稿集(東京2002-5), pp.217-218.