粗さ曲線のための位相補償デジタルフィルタ 適用に関する研究 (第2報)*

—— Δ_q 導出のためのガウシアンローパスフィルタの適用条件——

原 精一郎** 塚 田 忠 夫*** 伊 藤 公 俊†

The Conditions to Apply the Phase Corrected Filter to
Traced Profiles for Roughness Profiles (2nd Report)

— Application of the Gaussian Low-pass Digital Filter to Derivation of Δ_q —

Seiichiro HARA, Tadao TSUKADA and Masatoshi ITO

This paper presents an optimum condition to obtain the root-mean-square slope of the profile Δ_q and an application method of Gaussian low-pass digital filter to eliminate high-frequency noises. The main conclusions are as follows. (1) The range of convolution integral is 0.9 times cut-off wavelength λ_c and the space of data is $\lambda_c/12$. (2) It is appropriate that Δ_q is calculated by means of the seven-point method of numerical difference according to Lagrange's interpolation. (3) We make clear the effect of fluctuation of sampling interval on Δ_q . (4) The low-pass filter affects little the roughness parameters in the direction of profile height but largely those in the direction of profile length.

Key words: surface roughness, digital filter, low-pass filter, Gaussian filter, slope of the profile, mean line system

1. 緒 言

前報では、デジタルコンピュータにより処理することを前提として、表面粗さの平均線システム (mean line system) の基礎となるハイパスデジタルフィルタ (本研究では、デジタルフィルタをフィルタと呼ぶ) の適用法について報告し¹⁾、このフィルタにより得られる粗さ曲線を基に、種々の粗さパラメータ (本研究では、粗さパラメータをパラメータと呼ぶ) の特徴について検討した。

しかし、粗さ曲線の長さ方向に関するパラメータである二乗平均平方根波長 λ_q (root-mean-square wavelength of the profileの仮称) や凹凸の平均間隔 S_m (mean spacing of profile irregularities), 粗さ曲線の不規則性に関するパラメータである二乗平均平方根突起傾斜 Δ_q (root-mean-square slope of the profileの仮称) や算術平均突起傾斜 Δ_a (arithmetical mean slope of the profileの仮称) などは、すでに ISO 4287 に制定されており²⁾、固体の接触や摩擦・摩耗などトライボロジカルな問題、光の反射など光学問題などにとって重要なパラメータとなっている³⁾。これらのパラメータは、粗さ曲線に含まれる短波長成分の影響を強く受ける。特に、短波長成分を除去するローパスフィルタを掛ける前の粗さ曲線では、 Δ_q は、図1のように傾斜を求めるためのデータ間隔 Δx_q に強く依存し、 Δx_q が小さくなると短波長成分の影響を受けて Δ_q が増大する。

一方、後述するローパスフィルタを適用した後では、 Δx_q の小さい領域でこのような現象は現れなくなる。なお、図1の Δ_q は式(10)の7点公式により求めたものである。

以上のようにローパスフィルタを適用しないと、 Δ_q などのパラメータは、 Δx_q が変わると同じ粗さ曲線でもパラメータの値が異なることになる。このような不確実な状態に対応する手段として、短波長成分を除去するガウシアンローパスフィルタが ISO/DIS 11562 に提案されている⁴⁾。しかしながら、フィルタの適用条件は、前報と同様に明確にされていないばかりでなく、短波長成分の影響を最も受けやすい Δ_q を導く条件も確立されていない。 Δ_q は、前述したトライボロジカルな問題などにとって重要なパラメータであることの他に、JIS を ISO に整合させる方向にある現状を考えると、ローパスフィルタやパラメータ導出のための条件について検討することが必要となる。

本研究では、 $R_a=0.1\sim 2\mu\text{m}$ の試料 ($R_a>3\mu\text{m}$ の試料は参考) を対象とし、ガウシアンローパスフィルタの適用条件及び短波長成分の影響を最も受けやすい Δ_q の導出条件を明らかにする。さらに、粗さ曲線の高さ方向のパラメータ R_v (最大高さ), R_a (算

Fig.1 Δ_q derived by means of finite difference method for ground surface of specimen No.G8

* 原稿受付 平成 7年11月9日

** 学生会員 東京工業大学理工学研究科 (東京都目黒区大岡山2-12-1)

*** 正 会 員 東京工業大学情報理工学研究科 (東京都目黒区大岡山2-12-1)

† 正 会 員 東京工業大学総合理工学研究科 (横浜市緑区長津田町4259)

術平均粗さ),長さ方向のパラメータ S_m (凹凸の平均間隔),不規則性を表すパラメータ S_k (スキューネス:偏り度)に及ぼすローパスフィルタの影響についても調べる。

2. ガウシアンローパスフィルタ

ガウシアンフィルタは,図2の●印で示す重み h_k によるたたみ込み積分により実現される。入力データを z_i , ローパスフィルタの出力を z_i^* とすれば,

$$z_i^* = \sum_{k=-N_s}^{N_s} h_k z_{i+k} \Delta x_f / K \quad (1)$$

となる¹⁾。 Δx_f はフィルタに適用する図2のデータ間隔, N_s はたたみ込み積分の範囲である。 K は積分範囲内で $\sum_{k=-N_s}^{N_s} h_k \Delta x_f / K = 1$ とする補正值である。また, λ_s をローパスフィルタのカットオフ値とすれば, h_k は次式により与えられる。

$$h_k = \exp\{-\pi(k\Delta x_f/\alpha\lambda_s)^2\}/(\alpha\lambda_s) \quad (2)$$

$$\alpha = 0.4697$$

α は, λ_s において伝達関数を50%にする係数である⁴⁾。ローパスフィルタの伝達関数 H は, λ を波長として

$$H = \exp\{-\pi(\alpha\lambda_s/\lambda)^2\} \quad (3)$$

前報のカットオフ値 λ_c のハイパスフィルタとカットオフ値 λ_s のローパスフィルタをあわせたバンドパスフィルタは図3のようになる ($\lambda_c = 0.8 \text{ mm}$, $\lambda_s = 2.5 \text{ } \mu\text{m}$ の例)。本報では, このバンドパスフィルタの出力を新たに粗さ曲線(P)と呼ぶ⁴⁾。

図2の重み h_k をもったたたみ込み積分によるローパスフィルタの伝達関数 H^* は, N を基本波長内のデータ数, A_m を h_k のフーリエ級数における余弦波の m 次の係数とすれば, 次式により表される¹⁾。

$$H^* = A_m N / (2K) \quad (4)$$

式(3)と式(4)の差を誤差 ΔH として, 次式で与える。

$$\Delta H = H^* - H \quad (5)$$

粗さ曲線(P)用のローパスフィルタのカットオフ値 λ_s は, 標

Fig.2 Weighting function of Gaussian low-pass filter

Fig.3 Transmission band for roughness profiles

準としてハイパスフィルタのカットオフ値 λ_c の $1/300$ とすることが提唱されている⁴⁾。これに準拠すれば, 多用される $R_a = 0.1 \sim 2 \text{ } \mu\text{m}$ の範囲では, $\lambda_c = 0.8 \text{ mm}$ であるので標準の λ_s は約 $2.5 \text{ } \mu\text{m}$ となる。 λ_s が小さいので前報¹⁾とは異なりカットオフ値に対してデータ間隔を十分に小さくすることは難しくなるが, 積分範囲 N_s は十分に大きくとることが可能となる。

図4に ΔH に及ぼすフィルタ用のデータ間隔 Δx_f の影響を示す。式(4)に示すように, $N/2$ 次より高い成分 ($2\Delta x_f$ より短い波長成分) はフィルタ処理ができないので, $N/2$ 次より高い成分がないものとして表示した (この問題への対応例を 4.2 節で述べる)。図5は, $|\Delta H|$ の最大値 ΔH_{max} に及ぼす積分範囲 $2N_s \Delta x_f / \lambda_s$ とデータ間隔 $\lambda_s / \Delta x_f$ の影響を示す。 N_s は整数であるので, $2N_s \Delta x_f / \lambda_s$ 軸方向の ΔH_{max} は階段状に変化する。

3. Δq 算出のための条件

3.1 微小突起の傾斜

微小突起の傾斜 ξ_i の二乗平均平方根 Δq は, n を ξ_i のデータ数として

$$\Delta q = \left(\sum_{i=1}^n \xi_i^2 / n \right)^{1/2} \quad (6)$$

ξ_i を得る最も単純な方法は, 次式の差分による方法である。

$$\xi_i = (z_{i+1}^* - z_i^*) / \Delta x_q \quad (7)$$

ここで, Δx_q は等間隔にとられているものとする。一方, 測定データにラグランジュの内挿公式を適用し, 数値微分により微小突起の傾斜を求めることが提唱されている⁵⁾。

この方法による微分値は, 用いたデータ点の中央の位置において最も誤差が小さくなる⁶⁾。これに従うと, 3点公式 (データ数3点) による中央のデータ点 (3点公式では, 第2番目の点) での微小突起の傾斜 ξ_i は

Fig.4 Behavior of ΔH

Fig.5 Effect of $2N_s \Delta x_f / \lambda_s$ and $\lambda_s / \Delta x_f$ on ΔH_{max}

$$\xi_i = (z_{i+1}^* - z_{i-1}^*) / (2\Delta x_q) \quad (8)$$

同様に、5点公式、7点公式、9点公式では次のようになる。

$$\xi_i = (-z_{i+2}^* + 8z_{i+1}^* - 8z_{i-1}^* + z_{i-2}^*) / (12\Delta x_q) \quad (9)$$

$$\xi_i = (z_{i+3}^* - 9z_{i+2}^* + 45z_{i+1}^* - 45z_{i-1}^* + 9z_{i-2}^* - z_{i-3}^*) / (60\Delta x_q) \quad (10)$$

$$\xi_i = (-3z_{i+4}^* + 32z_{i+3}^* - 168z_{i+2}^* + 672z_{i+1}^* - 672z_{i-1}^* + 168z_{i-2}^* - 32z_{i-3}^* + 3z_{i-4}^*) / (840\Delta x_q) \quad (11)$$

3.2 数値微分方式とデータ間隔の設定

これらの数値微分の中から粗さ曲線に適する方式を選択すること、 Δ_q 用のデータ間隔 Δx_q を設定することが必要となる。

図6は、式(7)～(11)による振幅 a 、波長 λ の正弦波プロフィール $a \sin(2\pi x/\lambda)$ を対象とした Δ_q を示す。図6の縦軸は正弦波プロフィールの Δ_q を Δ_{qc} とし、 $\Delta_{qc} = \sqrt{2} \pi/\lambda$ により無次元化した。 Δ_q を求めるためには、 $\Delta_q/\Delta_{qc} \approx 1$ となる Δx_q の範囲が広い方が Δx_q の設定に余裕が出るので有利である。この観点から判断すると7点及び9点公式が推奨できる。本研究では、使用するデータ数が少ない7点法を採用することにする。

図7は、フィルタ用のデータ間隔 $\Delta x_f = 0.02 \mu\text{m}$ とし、 $\lambda_s = 2.5 \mu\text{m}$ のローパスフィルタを掛けたときの Δ_q と Δx_q の関係を示す。なお、ここでは後述するフィルタの適用条件を満たすようにした。縦軸は Δx_q が小さい領域で一定となっている Δ_q を Δ_{qc} とおき、これにより無次元化した。 Δ_q は、ローパスフィルタを適用しない場合は図1のように Δx_q の増加に伴って減少するが、ローパスフィルタを掛けたときには Δx_q の小さい領域でほぼ一定値になり、フィルタの効果が現れている。

実験に用いた試料を表1に示す。測定は触針式粗さ計により行い、データのサンプリングはリニアスケールにより $0.2 \mu\text{m}$ 間隔⁷⁾、時間基準により $0.02 \mu\text{m}$ 間隔で行った。また、研削及び旋削加工面は加工溝方向に直角な方向に測定した。図7において Δ_q に約2%の誤差を許容すれば¹⁾、本研究の試料では、 $\Delta x_q \leq 0.6 \mu\text{m}$ となり、余裕をみて $\lambda_s/5$ 以下とすれば十分である。また、 Δ_q の許容誤差が5%でよいとすれば、 $\Delta x_q \leq 0.8 \mu\text{m}$ でよく、 $\lambda_s/3$ より小さければよいといえる。

Fig.6 Δ_q by eqs(7)-(11) for sine wave profile

Fig.7 Correlation between Δ_q/Δ_{qc} and Δx_q under the sufficient condition of low-pass filter

4. ローパスフィルタの適用条件

4.1 フィルタのためのデータ間隔と積分範囲の設定

Δ_q を求めるためのデータ間隔 Δx_q を $0.4 \mu\text{m}$ とし、ローパスフィルタのためのデータ間隔を $\Delta x_f = 0.02 \sim 0.4 \mu\text{m}$ としたときの Δ_q を図8に示す。 Δ_q の精度の観点からは、 Δx_f に許容される最大値は図8から $0.4 \mu\text{m}$ としてもよいが、本研究では安全をみて $0.2 \mu\text{m}$ とし、 $\Delta x_f \leq \lambda_s/12$ でよいことにする。

$\Delta x_f = 0.2 \mu\text{m}$ 、 $\Delta x_q = 0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$ とした場合のたたみ込み積分の範囲 $2N_s \Delta x_f/\lambda_s$ と Δ_q の関係を図9に示す。 Δ_q がほぼ一定と見なされる範囲は $2N_s \Delta x_f \geq 0.8 \lambda_s$ である。余裕をみて、前報での積分範囲 $0.9 \lambda_s$ と同じに $0.9 \lambda_s$ を推奨値とする。 N_s は $2N_s \Delta x_f \geq 0.9 \lambda_s$ を満足する整数値となる。

以上の Δx_f と $2N_s \Delta x_f/\lambda_s$ の許容範囲における図5の最大誤差は $\Delta H_{max} \leq 2.5\%$ （厳密には2.45%）となる。

4.2 Δ_q に及ぼす短波長成分の影響とフィルタの条件

第2章で触れたように、 $2\Delta x_f$ より短い波長の信号は、デジタルローパスフィルタが適用できない上に、エイリアシング(aliasing)の効果で $2\Delta x_f$ より長い波長成分に折りたたまれてくる⁸⁾。図10は、非常に低い測定倍率（200倍、適切な倍率は

Table 1 Specimens and symbols

Specimen No.	R_a μm	Marks in Figs.	Specimen No.	R_a μm	Marks in Figs.
G1	1.3	○	L1	0.91	×
G2	1.3	●	L2	0.33	+
G3	1.0	△	L3	0.12	◎
G4	0.56	▲	L4	0.61	⊙
G5	0.28	□	T1	3.0	▽
G6	0.18	■	T2	2.5	▼
G7	0.43	◇	T3	0.29	回
G8	0.39	◆			

Note) Symbols of specimen G:ground, T:turned, L:lapped

Fig.8 Correlation between Δ_q/Δ_{qc} and Δx_q for $\Delta x_q = 0.4 \mu\text{m}$

Fig.9 Correlation between Δ_q/Δ_{qc} and $2N_s \Delta x_q/\lambda_s$ for $\Delta x_f = 0.2 \mu\text{m}$ and $\Delta x_q = 0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$

1000倍以上)で測定した試料 T2 のデータに $\lambda_s=2.5 \mu\text{m}$ のローパスフィルタを掛けた後の Δ_q と Δ_{x_f} の関係であり、 $\Delta_{x_f}=\Delta_{x_q}$ としたものである。 Δ_{q_e} は適切と思われる縦倍率1000倍で測定し、4.1節の条件を満たすフィルタを掛けた後の Δ_q である。 Δ_q/Δ_{q_e} は、 Δ_{x_f} が非常に小さい範囲でほぼ1であるが、 Δ_{x_f} が増えるにつれて大きくなる。縦倍率が低い測定データはSN比が悪いために高周波の信号成分がエイリアシングの効果により長い波長成分に折りたたまれ、 Δ_q を増大させたものと考えられる。

このような現象に対応する方法として、一般にカットオフ値の短いアナログフィルタが適用される⁸⁾。図10はカットオフ値 $0.8 \mu\text{m}$ の Butterworth 形ローパスフィルタ (減衰率24dB/oct) を掛けたデータに $\lambda_s=2.5 \mu\text{m}$ のデジタルフィルタを適用した場合の Δ_q である。エイリアシングの影響と思われる Δ_q の増大は見られなくなる。このように、短波長成分の影響が心配される場合は、適切なアナログローパスフィルタをあらかじめ適用しておく必要がある。本研究では、一例として $\Delta_{x_f}=0.2 \mu\text{m}$ とし、これによって表される形状の波長は $4\Delta_{x_f}$ 以上であるとして¹⁾、図3に示すカットオフ値 $0.8 \mu\text{m}$ のアナログローパスフィルタを使用した (位相遅れについては別途検討する)。

4.3 サンプル間隔のばらつきについての考察

サンプル間隔にばらつきがあると Δ_q を求めるデータ間隔 Δ_{x_q} も誤差をもつ。したがって、 Δ_{x_q} をデータ間隔の平均値とし、 Δ_{x_q} に重畳している誤差を ε_{x_i} とおけば、 z_i は近似的に $\xi_i \varepsilon_{x_i}$ の誤差をもつことになる。

ε_{x_i} による z_i の誤差はサンプリング理論⁸⁾ から $2\Delta_{x_q}$ 以上の波長の変動成分となるので、 λ_s のローパスデジタルフィルタでは除去できないことも考えられる。そのために、フィルタを掛けた後の ε_{x_i} による z_i^* の誤差を ε_{z_i} とする。 ε_{z_i} が独立で不規則に変動するものとし、標準偏差 $\sigma_{\Delta z}$ の正規分布に従うものとするれば、式(10)の7点公式による ξ_i の誤差の標準偏差 $\sigma_{\Delta \xi}$ は次のように推定することができる⁹⁾。

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta \xi} &= S \sigma_{\Delta z} / \Delta_{x_q} \\ S &= (a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_6^2)^{1/2} \\ a_1 &= a_6 = 1/60, \quad a_2 = a_5 = 9/60, \quad a_3 = a_4 = 45/60 \end{aligned} \quad (12)$$

上記の誤差がある場合の ξ_i の rms 値を Δ_{q_e} 、無い場合の値を Δ_q とおけば、変動が正規確率過程に従うものとして

$$\Delta_{q_e} = \Delta_q \{1 + (\sigma_{\Delta \xi} / \Delta_q)^2\}^{1/2} \quad (13)$$

ξ_i の代わりに微小突起の算術平均傾斜 Δ_a を用いることにし ξ_i が正規分布するものとするれば、 $\Delta_a \approx 0.81 \Delta_q$ となる¹⁰⁾。 ε_{x_i} が不規則変動し、その標準偏差が σ_x であれば、 $\xi_i \varepsilon_{x_i}$ の標準偏差 $\sigma_{\Delta z}$ の近似値は $\sigma_{\Delta z} \approx 0.81 \Delta_q \sigma_x$ となる。これを

Fig.10 Effect of analogue low-pass filter on Δ_q/Δ_{q_e} for specimen No.T2

式(12)に代入すれば、 $\sigma_{\Delta \xi} / \Delta_q = 0.81 S \sigma_x / \Delta_{x_q}$ が得られる。また、式(13)から $\sigma_{\Delta \xi} / \Delta_q = \{(\Delta_{q_e} / \Delta_q)^2 - 1\}^{1/2}$ となる。例えば、式(13)において Δ_{q_e} を Δ_q の1% 以内の誤差に収めたい場合には、

$$\sigma_{\Delta \xi} / \Delta_q = 0.81 S \sigma_x / \Delta_{x_q} \leq 0.14 \quad (14)$$

式(14)から $\sigma_x \leq 0.16 \Delta_{x_q}$ となる。

図11は、 $\Delta_{x_f}=0.2 \mu\text{m}$ 、 $\Delta_{x_q}=0.4 \mu\text{m}$ とし、試料G6のデータ z_i に次式の誤差

$$\varepsilon_{z_i} \approx (z_i - z_{i-1}) \varepsilon_{x_i} / \Delta_{x_q} \quad (15)$$

を加え、 $\lambda_s=2.5 \mu\text{m}$ のローパスフィルタを掛けた後の Δ_{q_e} / Δ_q の例である。 Δ_{q_e} は ε_{z_i} を与えたときの Δ_q の値である。 ε_{x_i} には標準偏差が σ_x の正規乱数を与えた。例えば、 Δ_{q_e} を Δ_q の1%の誤差以内に収める場合の σ_x の範囲は $0.3 \Delta_{x_q}$ 以下である。したがって、式(14)から導いた $\sigma_x \leq 0.16 \Delta_{x_q}$ は余裕のある見積りとなっている。これは、式(14)では ε_{z_i} の一部がフィルタにより除去されることを考慮していないためと考えられる。また、 ε_{z_i} の標準偏差は σ_x より小さく、図11のデータでは σ_x の1/8~1/14程度であった。したがって、 Δ_q に及ぼす Δ_{x_q} の誤差の影響は鈍感であるといえる。式(14)はローパスフィルタの効果が入っていないかたり、いくつかの仮定をおいているが、1つの目安になるものと思われる。

5. ローパスデジタルフィルタと粗さパラメータ

Δ_q 以外のパラメータに及ぼすローパスフィルタの影響について検討する。ローパスフィルタは、 $\lambda_s=2.5 \mu\text{m}$ とし、 $\Delta_{x_f}=0.2 \mu\text{m}$ 、 $\Delta_{x_q}=0.4 \mu\text{m}$ とする。ローパスフィルタを掛ける前と後のデータから得られるパラメータを P 及び P_0 とおき、ローパスフィルタによる影響 ΔP を次式により表すことにする。

$$\begin{aligned} \Delta P &= (P - P_0) / P_0, & \text{for } R_y, R_a, S_m \text{ and } \Delta_q \\ \Delta P &= P - P_0, & \text{for } S_k \end{aligned} \quad (16)$$

図12は代表的なパラメータの ΔP を示す。 R_z, R_a は R_y, R_a とほぼ同じ挙動を示していたので省いた。なお、横軸の R_a はローパスフィルタを掛けた粗さ曲線(P) から求めた値である。 R_a が小さい領域では、プロファイルの高さ方向に関する粗さパラメータ R_y, R_a, S_k の ΔP の変動は大きくなる。これはこれらのパラメータに及ぼす短波長成分の影響が大きいためと考えられる。しかし、 R_a の小さい領域の R_y の一部を除いて、ローパスフィルタの影響は少ないとみて差し支えない。

一方、プロファイルの長さ方向に関するパラメータ S_m についての ΔP の変動は相当大きくなる。これは、山の定義¹¹⁾ が山の高さ (平均線からの高さ) が R_y の10% 以上とされているので、

Fig.11 Effect of fluctuation of sampling interval on Δ_q

 Fig.12 Effect of low-pass filter on R_y , R_a , S_k , S_m and Δq

ローパスフィルタによって R_y 及び山の高さ y_p が変化したためと考えられる。この様子を図 13 に示す。図 13 はローパスフィルタによって消失した山、及び新たに出現した山を対象としたものである。 ΔR_y はローパスフィルタを掛けた後の R_y から掛ける前の R_y を差し引いた値であり、 Δy_p は同様に山の高さ y_p の差である。 $0.1 \Delta R_y = \Delta y_p$ の直線より下方のデータは新たに出現した山、上方は消失した山を表している。図 13 ではこの直線より上方のデータが多いので、山が消失したために図 12 の S_m が大きくなったと解釈できる。また、データの変動は Δy_p 軸方向に大きいので、ローパスフィルタによって R_y より y_p の方が大きく変化し、山の数が増減したことになる。

また、図 12 の Δq に関する ΔP は、 $\Delta x_0 = 0.4 \mu\text{m}$ の条件で求めたが、 ΔP は非常に大きく変動している。緒言で述べたよ

 Fig.13 Correlation between ΔR_y and Δy_p

うに、ローパスフィルタが大きく影響するパラメータであることが分かる。

6. 結 言

粗さパラメータ Δq に最も影響すると考えられる短波長成分を除去するためのガウシアンローパスデジタルフィルタの適用条件について検討した本研究の主な結論は次のようになる。

- (1) カットオフ値 λ_s のローパスフィルタのたたみ込み積分の範囲は $0.9\lambda_s$ 以上、データ間隔は $\lambda_s/12$ 以下であればよいとし、そのときのフィルタの誤差は約 2.5% であることを明らかにした。
- (2) 粗さパラメータ Δq のための数値微分は 7 点公式で十分であるとし、 Δq の許容誤差を約 2% とすれば、データ間隔は $\lambda_s/5$ 以下でよいことを示した。また、許容誤差を 5% とする場合の条件も参考に示した。
- (3) デジタルフィルタでは除去が難しい短波長成分が Δq の精度を低下させることを示し、対応例について考察した。
- (4) Δq に及ぼすデータのサンプリング間隔のばらつきの影響を検討し、ばらつきの許容誤差の例を示した。
- (5) ローパスフィルタによる影響は、プロファイルの高さに関するパラメータに対しては少なく、プロファイルの長さ方向のパラメータに対しては大きくなることを明らかにした。

参 考 文 献

- 1) 原 精一郎, 塚田忠夫, 伊藤公俊: 粗さ曲線のための位相補償デジタルフィルタ適用に関する研究 (第 1 報), 精密工学会誌, 62, 4(1996) 594.
- 2) ISO 4287/1-1984: Surface roughness—Terminology—Part 1: Surface and its parameters.
- 3) D.J.Whitehouse: Handbook of Surface Metrology, Inst. of Physics Pub. London, (1994) 18.
- 4) ISO/DIS 11562-1993: Metrological characterization of phase corrected filters and transmission bands for use in contact instruments.
- 5) ISO/DIS 4287-1-1994: Surface texture—Part 1, Terms, definitions and parameters of surface texture—Profile method.
- 6) 赤坂 隆: 数値計算, コロナ社, (1967) 52.
- 7) 塚田忠夫, 加藤勝男, 趙南圭: 三次元表面凹凸測定機における試料表面姿勢制御に関する研究, 精密工学会誌, 58, 4(1992) 697.
- 8) J.S.Bendat and A.G.Piersol (徳丸英勝訳): ランダムデータの統計的処理, 培風館, (1981) 226.
- 9) 吉本 勇: 工学統計解析, 養賢堂, (1981) 26.
- 10) 塚田忠夫, 阿武芳朗: 機械加工面における表面おうとつの評価に関する研究 (第 3 報), 精密機械, 40, 3(1974) 250.
- 11) ISO 468-1982: Surface roughness—Parameters, their values and general rules for specifying requirements.