

工作機械のトライボロジーのための表面粗さ解析法の研究

Research on effective analysis method of surface roughness for machine tool tribology

法政大・理工（正）*吉田 一郎 法政大・院（非）上赤 竜也 法政大・院（非）榎原 僚

Ichiro Yoshida, Tatsuya Kamiaka*, Ryo Sakakibara*

*HOSEI University

1. はじめに

トライボロジストの尽力により工作機械のトライボロジー特性は飛躍的に向上し、潤滑油や形状精度だけでなく表面性状・表面粗さも深く考慮しなければならない時代になっている。表面粗さの計測は、製品の品質評価や製造工程・製造装置の状態把握だけでなく、研究開発などでも不可欠な計測のひとつである。なぜなら、表面粗さは製品の機能や品質に深く関係し、研究開発ではその測定と解析が高機能化・高効率化や現象解明に大きく寄与するからである。

表面の凹凸を測定したデータは、現在の規格群^{1,2)}ではその波長の大きさを基準として形状誤差、うねり、粗さ及び量子化誤差やノイズなどの微細な成分とに区分して評価することになっている¹⁾。そのため、粗さ解析において、微細凹凸波形のデジタルフィルタリング技術は非常に重要な技術であると同時に、その研究開発も不可欠である。一般的に広く使われているデジタルフィルタは、JIS B 0634 (ISO 16610-21) のガウシアンフィルタ²⁾があげられる。プラトー構造表面³⁾（以下、プラトー表面）用のデジタルフィルタとしては、この JIS B 0634 のガウシアンフィルタを応用した JIS B 0671-1 (ISO 13565-1) の特殊ガウシアンフィルタ³⁾が規格化されているが、実際のプラトー表面に適用すると表面プロファイルに歪みを生じさせてしまうという課題がある⁴⁾。そのため、これらの課題の解決を目指して、転がり円接触フィルタ⁴⁾などのロバスト性を有するデジタルフィルタ^{5,6,7)}が継続的に研究されている。

また、プラトー表面は、一般的な粗さパラメータである Ra 、 Rz では妥当性高く評価できないため、負荷曲線を活用した方法^{8,9,10,11)}が模索されており、専用の評価法として JIS B 0671-3 (ISO 13565-3)³⁾も制定されている。しかし、この JIS B 0671-3 で規定されている方法は、処理が煩雑なことや計算アルゴリズムが不明確であることなどが原因となって、表面粗さ測定機メーカーやソフトウェアメーカーが実装できないという課題を抱えていた。そのため、この課題を解決するために、計算アルゴリズムに最適化技法を応用して煩雑な処理と実装の難しさを解消した評価方法^{12,13)}が研究開発された。この評価方法は、日本の表面粗さ測定機メーカーの粗さ解析ソフトウェアに実装され、産業界で利用されている。産業界からの更なる要望に応えるために、現在もこのプラトー表面の評価・解析法は研究開発されている。

本報では、工作機械のトライボロジーに有効な機能表面であるプラトー表面の粗さ評価法の動向や研究について解説する。具体的には、プラトー表面に適したデジタルフィルタおよび評価法・パラメータについて触れる。

2. プラトー表面の評価

2.1 デジタルフィルタ

プラトー表面³⁾は、図 1 のような表面凹凸をしており、精密機器や自動車部品、エンジンのシリンダ内面の仕上げに用いられる。図 1 のとおり、表面凹凸の山部分が削れて平らになっているため摺動性に優れる。また、谷部分はそのまま残っているため、潤滑油の保持と供給を担う油溜りの役割があり、潤滑性に優れるというメリットがある。

プラトー表面のうねり成分を除去して粗さパラメータを得るためにデジタルフィルタを適用するが、このプラトー表面に ISO 規格のガウシアンフィルタ^{2,3)}を適用すると、図 2 の矢印部のような深い谷部の影響を受けて歪んだ粗さ曲線となる⁷⁾。このような歪みの発生原因は、ガウシアンフィルタが、凹凸が高さ方向に正規分布するような表面プロファイルを対象としているためである。したがって、この課題を解決し、プラトー表面に適用しても歪みを発生させないロバストなフィルタが必要となる。ロバストフィルタの例としては、転がり円接触フィルタ⁴⁾や高速 M 推定ガウシアンフィルタ⁵⁾があり、更なる性能向上を目指し現在も研究が進められている。図 3 は、転がり円接触フィルタをプラトー表面に適用した結果である。図 2 のような歪みを発生させず、かつ、うねり成分を除去できていることがわかる。

2.2 プラトー表面のための粗さパラメータ

プラトー表面のための粗さパラメータは、JIS B 0671-3 に Rpq 、 Rvq 、 Rmq ³⁾の三つのパラメータが規定されている。

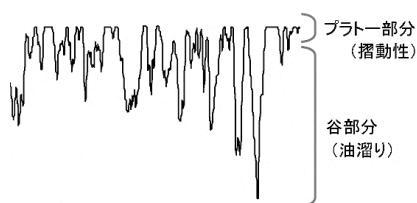


Fig. 1 Plateau structure surface¹¹⁾

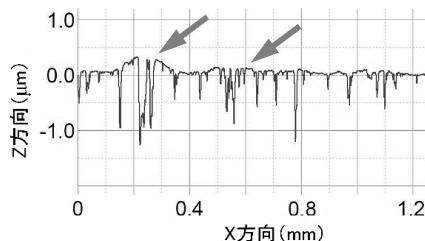


Fig. 2 Distorted surface by using of Gaussian filter in ISO16610-21¹¹⁾

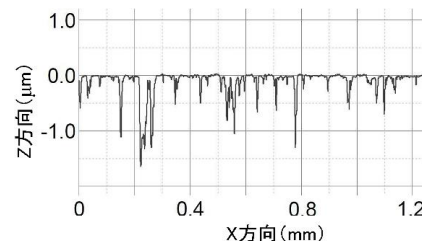


Fig. 3 Surface without distortion by using the rolling ball filter¹¹⁾

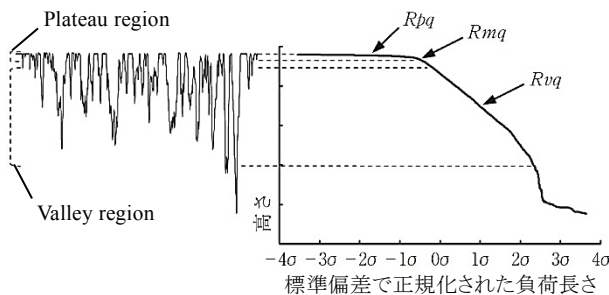


Fig. 4 R_{pq} , R_{vq} , and R_{mq} on Material probability curve¹¹⁾

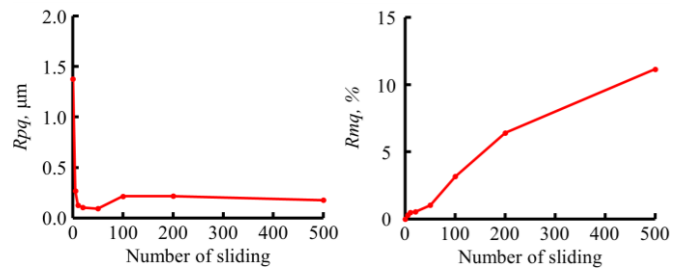


Fig. 5 R_{pq} , R_{mq} and number of sliding cycles¹⁷⁾

図4にそれぞれのパラメータと正規確率紙上³⁾の負荷曲線を示すが、 R_{pq} がプラトー部分の粗さ、 R_{vq} が油溜りの谷部分の粗さ、 R_{mq} がプラトー部分と谷部分の比率を解析できる。例えば、 R_{pq} はプラトー部分の最適な粗さを分析でき、 R_{mq} は摺動部品の表面のプラトー化の最適な比率を分析することも可能になる。工作機械の摺動面を想定した研究¹⁴⁾では、プラトー化の比率 R_{mq} を20～30%にすると摩耗の進展が停止し摺動性が向上するとの知見が得られている。

近年は、画像認識アルゴリズムやデータサイエンスを応用したプラトー表面の評価方法^{15, 16, 17)}が開発されている。この方法では、先行研究の方法^{12, 13)}よりも単純明快なアルゴリズムを開発¹⁵⁾することによって測定機メーカーや産業界での実装を容易とし、また、計算時間の高速化を図っている^{16, 17)}。

一方、これらの評価方法^{12, 13, 15, 16)}には、摩耗が進展しておらずプラトー化が不十分な表面は、粗さ解析が困難であるという欠点があった。そこで、摺動回数が少なく摩耗が十分でない表面凹凸であったとしても、解析を可能とする方法の研究¹⁸⁾が行われている。この方法では、重み付き最小二乗法を用いることにより、プラトー部分の形成が十分に進んでいなかったとしても R_{pq} , R_{vq} , R_{mq} の導出を可能とした。図5は、摺動回数に対するプラトー部分の粗さ R_{pq} の変化、および、プラトー部分の比率 R_{mq} の進展を、この方法¹⁸⁾により求めた結果である。図5の通り、摺動回数が増加するに伴い R_{pq} の値の減少とプラトー部分の比率 R_{mq} の増大が解析できていることが分かる。これにより、今までは困難であった、未摩耗の状態から摩耗が進展してプラトー化が完了するまでの過程の解明が可能となった。

3. おわりに

優れたトライボロジー特性をもつ表面や機能表面は、特殊な形状の表面凹凸になっていることが多いため、一般的なガウシアンフィルタや表面性状パラメータでは対応できないことが多い。今後も、このような機能表面の幾何学的特徴を有効に評価・解析できる新たなデジタルフィルタやパラメータの研究開発に鋭意取り組む所存である。本稿で述べた内容が、トライボロジー学会や工作機械分野の皆様、ひいては、日本の発展に貢献できれば幸いである。

文献

- 1) JIS B 0601:2013, 用語, 定義及び表面性状パラメータ(ISO 4287:1997, Amd.1:2009), (一財)日本規格協会。
- 2) JIS B 0634:2017, 線形の輪郭曲線フィルタ:ガウシアンフィルタ(ISO 16610-21:2011), (一財)日本規格協会。
- 3) JIS B 0671-1,2,3:2002, プラトー構造表面の評価—第1, 2, 3部(ISO 13565-1,2,3:1996,1998), (一財)日本規格協会。
- 4) 吉田一朗・塚田忠夫, 二層構造表面におけるプラトー領域の基準線, トライボロジスト, 53, 2(2008)126。
- 5) 近藤・沼田・奥水・神谷・吉田:ロバスト性調整可能な高速 M 推定ガウシアンフィルタ, 精密工学会誌, 82, 3 (2016)272。
- 6) ISO 16610-31, GPS -- Filtration -- Part 31: Robust profile filters: Gaussian regression filters, 2016。
- 7) 近藤・吉田・沼田・奥水:プラトーホーニング面等の機能性表面に有効なロバストフィルタの動向と事例, 砥粒加工学会誌, 61,11(2017)24。
- 8) P. Pawlus, R. Reizer, M. Wiecezowski, and G. Krolczyk: Material ratio curve as information on the state of surface topography-A review, Precision Engineering, 65(2020)240。
- 9) P. Pawlus, R. Reizer, and M. Wiecezowski: Functional Importance of Surface Texture Parameters, Materials, 14(2021)5326。
- 10) 吉田一朗:表面粗さ—その2 ちょっとレアな表面性状パラメータの活用方法—, 精密工学会誌, 79, 5(2013)405。
- 11) 吉田・他:工作機械のトライボロジーに有効な表面性状・表面粗さ評価法の研究, トライボロジー会議 2020 秋 B1。
- 12) 吉田一朗・塚田・新井:二層構造表面性状の評価(第1報, 負荷曲線の双曲線近似), 設計工学, 44, 5(2009)301。
- 13) 吉田一朗・塚田・新井:二層構造表面性状の評価(第2報, パラメータの導出), 設計工学, 44, 11(2009)624。
- 14) 吉田一朗・塚田忠夫・新井陽介, 三層構造表面のキャラクタリゼーション, トライボロジスト, 53, 2(2008)126。
- 15) 吉田一朗・伊是名秀昭, プラトー構造表面の評価方法の開発, 設計工学, 53, 3(2018)227。
- 16) Yoshida I., Kondo Y., Wakatsuki G. & Numada M.:Study of a Plateau Surface Evaluation Method Using a Fast M-Estimation Type Hough Transform, Int. J. Automation Technol., 13, 1(2019)118。
- 17) S. Nagai, I. Yoshida, K. Oshiro, R. Sakakibara: Acceleration of surface roughness evaluation using RANSAC and least squares method for Running-in wear process analysis of plateau surface, Measurement, 203(2022) 111912/1-10。
- 18) R. Sakakibara, I. Yoshida, S. Nagai, Y. Kondo, K. Yamashita: Surface roughness evaluation method based on roughness parameters in ISO 13565-3 using the least-squares method for running-in wear process analysis of plateau surface, Tribology International, 163(2021)107151/1-9。