

解説1 超精密微細加工機における要素技術

碌々産業 川津 和司*

*かわつ かずし：技術本部微細加工研究G

はじめに

日本工作機械工業会でまとめられた2018年1月の受注実績によると、今年も活況が続いているとの報告がなされている。そして、今までは、スマートフォンなど特定の産業分野に偏っていたが、2018年以降の業界別の動向では、日工会の飯村会長の「広範囲にわたって取れている」との言葉通り、自動車や半導体、一般機械などさまざまな産業分野で設備投資が進んでいる。また、世界の製造業は、IoT（モノのインターネット）、人工知能（AI）などの先端技術の登場や自動車の電動化（EV）といった産業構造の転換を背景に変革の時代にあるといえる¹⁾。

著者が属している工作機械メーカーは、超高精度微細加工機を設計・製造販売している。超高精度微細加工機Genesis(写真1)は、最新立形微細加

工機で、案内および送り系とも完全非接触の構造として、さまざまなノイズに影響されにくく正しい運動が実現できるように設計製造した機械である。それとともに、加工機の状態、加工機の設置環境などを含むあらゆる情報をIoTおよびクラウド環境にて活用するシステムも搭載している。それらの情報を顧客と共有化し、微細加工における高精度化、高面品位の要求に対応すると同時にそれらを安定生産できるサービス環境を整備し、超高品位微細加工できることを目指している。

この超高精度微細加工機で加工されている製品として、AIおよび自動車に使用されている半導体の大量生産を支えるプローブカード（CPU電通検査用治具）の超高精度穴あけ加工や、自動車のヘッドライトの反射鏡の金型などの加工に使われている。この微細加工とは、安定的に1 μm 以下の精度を実現する機械である。

レンズ周辺部品、LED金型などの光学部品は、加工精度とともに、平均面粗さ数十nmと高い加工面品位が求められているため、これらの加工面は光沢ムラをなくすことが必要であり、送り軸の細かさや滑らかさが重要視されている。この送りの滑らかさを評価する1つが、うねりである。超精密微細加工機Genesisの案内は、油静圧案内であり、このうねりがきわめて小さく滑らかな送りが実現できている。

本稿では、この工作機械の直行案内のうねり（案内の運動中に発生する細かな変動であるウェービングも含む）について報告する。



写真1 油静圧案内の超精密微細加工機 Genesis

案内の種類

現在、高精度な加工機に用いられている案内の種類には下記のものがある。

- (1) すべり案内
- (2) 転がり案内
- (3) 静圧案内

転がり案内は、ほかの案内よりも安価で入手でき、しかも運動精度、低摩擦抵抗に優れ、コストパフォーマンスの高い案内要素である。静圧案内は、コストに難があるが、運動精度および減衰能、超低摩擦抵抗などの機械特性に優れた案内である。

当社でも加工機の使用目的にあった案内構造として各種案内を製作および採用している。それらに使われている案内方式の特性を熟知し、利点欠点を知った上で採用することが必要である。次に当社テストスタンドで行った転がり案内、静圧案内について紹介する。

転がり案内の特徴

代表的な転がり案内がボールタイプの循環形転がり案内を図1に示す。

転がり案内の特徴²⁾を下記に記す。

- (1) 予圧を与えることにより、遊びゼロの案内が構成できる。
- (2) 寿命・疲れ寿命が計算で求められる。
- (3) 摩擦係数は0.02~0.04、しかも摩擦力の変動も少ない。

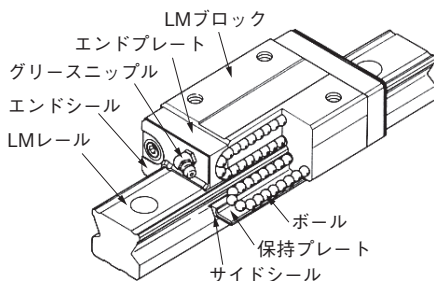


図1 ボールタイプ循環形転がり案内 (THK資料より)

- (4) 不着すべり (スティックスリップ) が発生しない。
- (5) 転動体の寸法差の原因によるプリロードの変化および弾性変形などにより、ウェービングまたは転動体通過振動(これらを含んでうねりと称する)が生じる。
- (6) 転がり案内を複数個使用時には、「誤差平均化転がり効果」により運動誤差が減少する³⁾。

転がり案内は、潤滑が簡素化でき、取付けや組立て調整がしやすく、高速運転ができるなどの特徴をもつ。

転がり案内の運動精度には、広範囲の真直度精度と小さな領域で生じる姿勢変化によって生じるうねりがある。このうねりは、製品の品位および見栄えに直接影響する要因であるが、今まであまり論じられていない。たとえば、立形のマシニングセンタで転がり案内が採用された加工機で平面加工を行った場合、加工面の加工送り方向に直角方向の周期性な平行縦縞が加工面に転写されることがある。この周期が転がり案内の転動体の組付けピッチの2倍の周期間隔の場合には、転がり案内の転動体通過振動によるものと推定される。近年これらの加工面に対する品位が注目され始めたのか、工作機械各社の案内に使用される循環形転がり案内の構成部品である転動体がボールからころに代わってきている。

1. うねりの発生要因

転動体通過振動およびうねりは転がり案内に生じる現象であり、構造上避けることができない。この現象は、転動体と転動面との弾性変形の変動により、ベアリングブロック自体が振動することにより姿勢が変わるもので、加工面に周期的な縞模様が生じることがある。

その発生要因には、2つの要因がある。

「要因1」：転動体が非負荷領域から負荷領域または、負荷領域から非負荷領域に入る際の負荷変動により発生する振動である。予圧された転動体が軌道面両端部の非負荷領域のクラウニング部を通過し負荷領域の直線部に図2のように出入りするとき、ボールの弾性変形の変化が不連続に生じ、ベアリングブロックの姿勢に間欠的な変動を与え

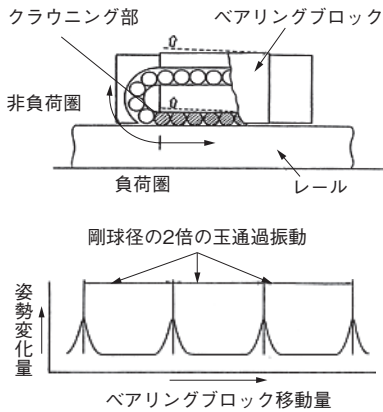


図2 転がり案内の玉の出入りによる姿勢変化と転動体通過振動 (NSK資料より)

ることにより生じるもので、転動体通過振動と称する振動である⁴⁾。

転動体通過振動は、転動体の径1回転するとベアリングブロックが転動体径の2倍移動するので、周期はボール径 D_w の2倍となる。

この通過振動数は次式により求めることができる⁴⁾。

$$f = \frac{V \times 10^3}{2 \times 60 \times D_w} \text{ (Hz)}$$

ここで、転動体通過振動数 f (Hz)、テーブル(またはベアリングブロック)移動速度 V (m/min)、転動体の径または転動体ピッチ D_w (mm)

「要因2」：循環形転がり案内の上下、左右方向溝の転動体配置の変化により、負荷変動が生じて発生する振動であり、循環形しか生じない現象である。転がり案内の一般的な形状は、レールに4条の転動溝がある(図1)。この上下左右溝の転動体の数、位置によりベアリングブロックが振動する。たとえば、図3で上下の転動体数が釣り合っている場合(a)よりブロックが径の半分移動し、下溝の転動体数が増加すると、下溝転動体1個当りの予圧荷重が小さくなるのでベアリングブロックが下降する(b)。次にさらにブロックが径の半分移動し、上溝の転動体数が増加すると、ベアリングブロックが上昇する(c)。この周期は、転動体通

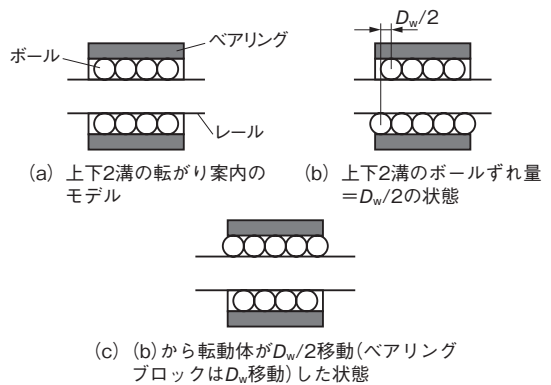


図3 転動体配置による振動 (NSK資料より)

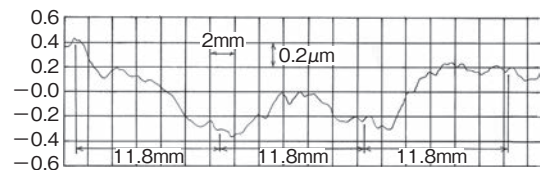


図4 平面加工による加工面うねり

過振動と同周期であり、上下左右とも同周期となる⁴⁾。

2. うねりの影響と対策

テストスタンドにリニアガイドを取り付け、その上にラジラスエンドミルが取り付け付いた主軸を乗せて、平面加工を行った。

そのときの加工した表面形状を面粗さ計にてうねり測定した測定例を図4に示す。この加工面うねりの周期と転がり案内のうねりピッチ(11.8 mm)は一致している⁵⁾。転がり案内の予圧量を変えずに、転動体1個に加わる荷重を低減するためにベアリングブロックの長さを約1.5倍長くし、転動体の数を増やすことと、クラウニング部(図2)の長さなどを改善し、転動体がスムーズに入出力できるように改善を行った。その結果、うねりの振幅を低減できた[図5(a)]。そのときの加工面うねり測定結果を図5(b)に示す⁵⁾。

このように、転動体1個に加わる負荷を低減し、転動体のスムーズなクラウニング部の出入りを可能にすることにより、狭範囲の運動精度を高めることができ、加工面も向上できた。この改善は、