高精度ボールねじにおけるラップ仕上げの自動化とよろめき補正可能な工具の開発

久曽神　煌*　　磯部浩已*　　細貝　豊**

Development of automatic lapping method for high precision ball screw and lapping tools for improvement of error on travel

KYUSOJIN Akira, ISOBE Hiromi and HOSOGAI Yutaka

抄　　録

熟練作業者の経験と感覚に委ねられていたボールねじ軸のラップ作業を自動化し、安価でかつ超高精度なボールねじの量産化を実現させる。また、移動量誤差変動（よろめき）をラッピングで可能にするために、多数のラップ歯を持つ新形式のラップ工具を開発した。

1　緒　　言

近年、工作機械・半導体製造装置の高精度化やCD-ROM・DVDなどの一般化によって、市場では高精度なボールねじが大量に必要となっている。しかし、その製造工程の最終ラップ仕上げ作業は人力に頼らざるをえない。本研究では、ラップ作業中に移動量誤差を推定し、精度の悪い部分を自動的に、重点的にラップすることで、ねじ軸全体の精度を目的の等級まで、効率よく向上させる。この結果、これら熟練作業者の経験と感覚に委ねられていたボールねじ軸のラップ作業を自動化し、安価でかつ超高精度なボールねじの量産化を実現させる。また、従来のラップ工具では1回転中の移動量誤差変動（よろめき）の補正は不可能であった。本研究では、多数のラップ歯を持つ新形式のラップ工具を開発し、ラッピングによるよろめき修正を可能にすることで、さらなる高精度化を図る。

2　ラッピングによるよろめき補正の理論

2つ割りラップ工具を用いた円筒ラッピングにおいて、ラッピング前の断面形状成分のうち、3角形や5角形成分などの奇数山成分は減少しないことが証明されている。この円筒ラッピングにおける理論解析を応用して新形式のラップ工具を設計する。まず、円筒の断面形状成分をラッピングによって減少させ、真円に近づけることを考える。ラップ工具の形状を等角多角形（k角形）とし、ラッピング中は工作物にラップ工具が外接すると仮定して、加工物形状（円筒軸）によるラップ工具中心の軌跡の変化を考える。表1において、空欄はラッピング中に加工物とラップ工具の中心が常に一致していることを示す。従って、その断面形状の凸部は削りとられるので、断面形状成分は減少するこ

表1　ラップ工具の振れ回り

n \ k	Regular Polygon of k Angles							
	2	3	4	5	6	7	8	9
Ellipse 2		×						
Triangle 3	×		×					
Square 4		×		×				
Pentagon 5	×	×	×		×			
Hexagon 6				×		×		
Heptagon 7	×	×	×		×		×	
Octagon 8		×				×		×
Nonagon 9	×		×	×			×	

*　長岡技術科学大学　機械系
**　ケースエス株式会社

とを意味する。一方、×印の場合には、断面形状の凹凸に応じてラップ工具も同じ量だけふれまわるので、断面形状成分は減少しない。等角 k 角形の工具を使うことで、断面形状の（k-2）山成分を全て減少させることが可能になる。

これまで述べてきた円筒軸の断面形状は、半径方向に対する形状誤差である。一方、ボールねじは、円筒にくさび形状をした紙を巻きつけてできる「つる巻線」に適当な形状の溝を設けたものである。移動量誤差は、つる巻線の軸方向に対する形状誤差であり、ねじ研削盤の親ねじ精度、親ねじ軸受の偏心、主軸軸受のスラスト振れなどの影響による。また、ボールねじの一回転における移動量誤差の変動成分をよろめきと呼ぶ。

円筒ラッピングの理論は、工作物の半径方向断面形状に対して提案されたものである。ボールねじのラッピングに対しては、この理論を軸方向の移動量誤差に拡張したものである。従って、円筒ラッピングにおける断面形状成分が、よろめきの周波数成分に相当する。

3　ラッピング実験装置

3．1　ラップ工具

これまでにボールねじ軸の最終仕上げとして行われるラッピングにおいては、製作が容易で安価な2つ割りや3つ割りのラップ工具が用いられてきた。しかし、この工具では、ねじ溝研削後のボールねじ軸が有する移動量誤差成分のうちで、ねじ軸一回転中に変動する成分（旧JISにおいては「よろめき」と表現）を修正することはできない。そこで本研究では、図1に示す6つ割りラップ工具を製作した。従来のラップ工具と同様に、円筒状のコマの内面に、加工対象となるボールねじ軸の溝面に適合するねじ山が作られている。ただし、両端面から、合計6本のスリットが刻まれており、周囲から圧力を掛けることによって、6カ所のラップ歯が均等にボールねじに接触し、加工が行われる。

3．2　自動ラップ盤

表2　ラッピング実験条件

a)ボールねじ仕様

ねじ部有効長さ	260mm
ねじ軸外形	14mm
リード	2mm
ボール直径	1.5875mm
等級	C5級（JISB1192-1997）
ねじ溝形状	ゴシックアーク
材質	SCM415
熱処理	浸炭焼き入れ
硬さ	HRC58～62

b)ラッピング条件

ねじ軸回転速度	200 rpm
砥粒	FO#600
ラップオイル	なたね油
加工範囲	200 mm (100 leads)
初期ラップトルク	1.8～2.2 N･m

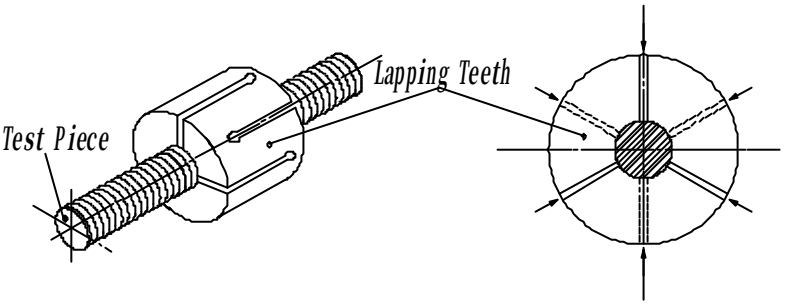


図1　6つ割り型ラップ工具

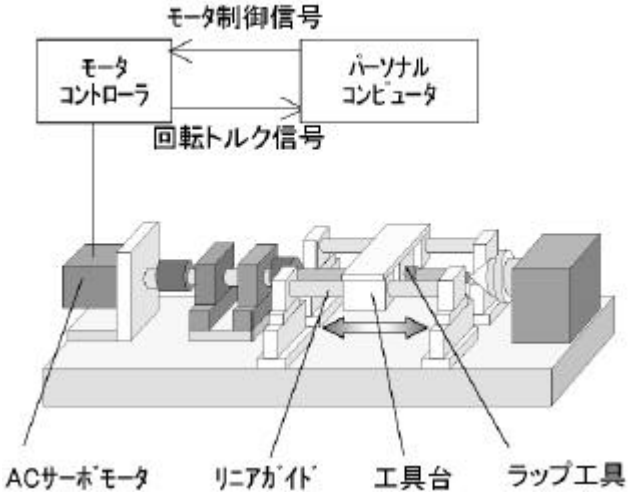


図2　自動ラップ盤概略図

図２に製作した自動ラップ盤の概略図を示す。装置の簡易化・小型化およびラップ砥粒塗布を容易にするために、装置を横型とした。その結果、テストピースの寸法を考慮して、ベースプレート長さ1000㎜、幅300㎜と小型にすることができた。手作業ラッピングにおいては、作業者はラップ工具を手で柔軟に保持し、ねじ軸のたわみやそりがラッピングに与える影響を取り除いている。ここでは、工具台とラップ工具間にポリウレタン製のワッシャおよび平行板ばねを介すことで、ねじ軸のたわみやそりを吸収する構造とした。

４　ラッピング実験結果

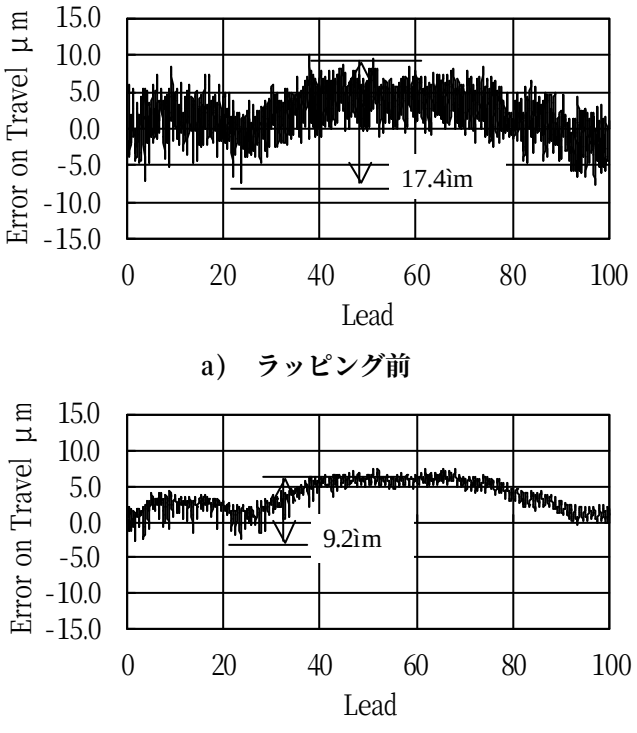
表２に、試料ボールねじの仕様およびラッピング条件をまとめた。自動ラップ盤に試料ボールねじをセットした後、ラップ工具取り付けジグの調整ねじによって、加工圧力（ラップトルクが1.8～2.2N･mの範囲に入るように調整する。初期ラップトルクはトルクレンチによって測定した。

４．１　移動量誤差の変化

ラッピング前と10往復のラップ作業後における移動量誤差の変化を、0～100リードの範囲内に渡って測定した結果を図３に示す。これより、わずか10往復程度のラッピング（時間にして10分)によって､移動量誤差の最大変動幅は、17.4ìmから9.2ìmと半分程度まで減少しており、提案した新型ラップ工具の高い加工能率および加工精度が明らかとなった｡また､図４は、１リード中における移動量誤差の変動成分（よろめき）を周波数解析した結果である。ラッピング前、ねじ研削盤の親ねじの移動量誤差が、試料ボールねじ軸に転写されたため､2.2山､4.4山成分が支配的となったと考えられる。この試料ボールねじに､10往復のラッピングを行った結果、よろめきの支配的な成分は、ほぼ取り除くことができ、提案した新型ラップ工具がよろめきの修正に有効であることが確認された。

４．２　ラップトルクによる移動量誤差および有効径変動の推定

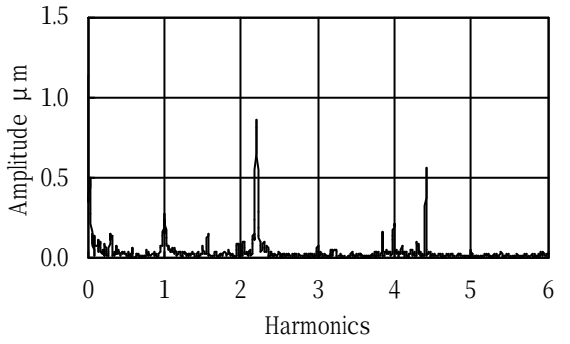
熟練作業者は、ボール盤に取り付けられたボールねじ軸を回転させることで、手で持ったラップ工具をねじ溝に対して摺動さる。そして、その時に感じたトルク変動（ひっかかり、重み



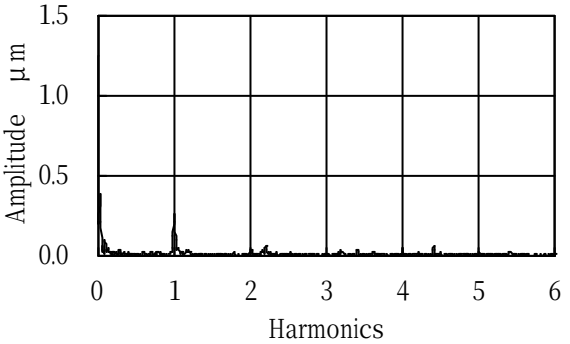
a)　ラッピング前

b) ラッピング（10サイクル）後

図３　ラッピングによる移動量誤差の変化



a)ラッピング前



b)ラッピング（10サイクル）後

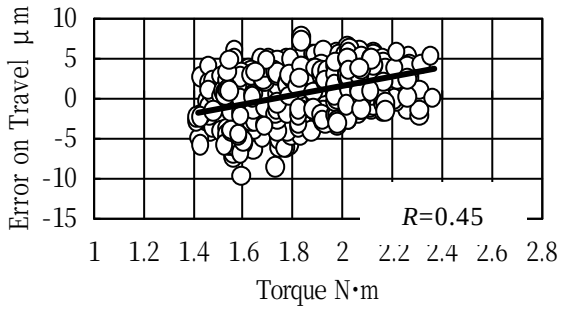
図４　よろめきの周波数成分の変化

など）の大きい部分を重点的に繰り返し加工を行う。その結果、他の部分と比べて移動量誤差や有効径変動の大きい部分を修正していると考えられる。

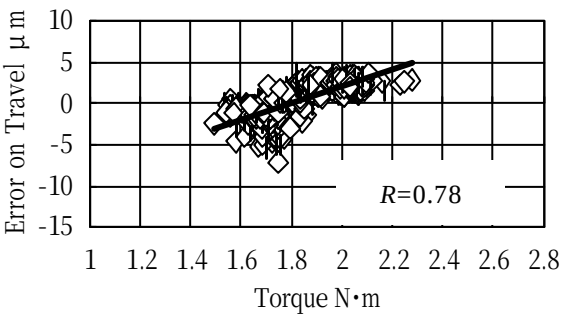
しかしながら、これまでにトルク変動と移動量誤差および有効径の関係については明らかになっていない。そこで、トルクと移動量誤差の関係を図５に、トルクと有効径の関係を図６に示す。また、図中には最小二乗法によって求めた近似直線および相互相関係数 R を併記した。

移動量誤差とラップトルクの相関関係（図５）は、ラッピング前には R=0.45 と、明確な相関関係を見ることはできなかった。その理由としては、トルク変動の大きな理由が表面粗さなどによるため、移動量誤差がトルクに与える影響が相対的に小さかったものと考えられる。また、10 サイクルのラッピング後では、相関係数は R=0.78 となった。相関係数が増加した理由としては、ねじ研削工程で生じたばりや表面粗さが、ラッピング工程の初期段階で修正されたため、トルク変動幅が小さくなったと考えられる。以上の結果、ラップトルクによる移動量誤差の推定の可能性が見いだされた。

有効径とラップトルクの関係（図６）についても、10 サイクルのラッピングによって、相関係数は 0.77 から 0.91 に増加しており、両者には明らかな相関関係があることを確認できた。



a)ラッピング前



b)ラッピング（10 サイクル）後

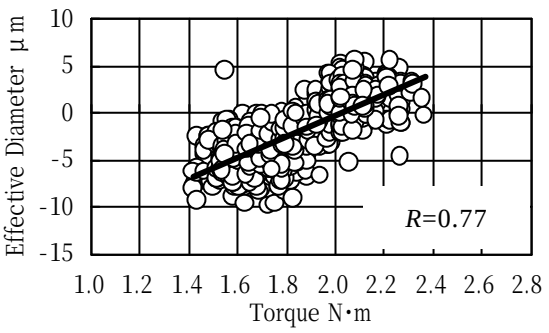
図５　移動量誤差とラップトルクの相関関係

５　有効径自動測定器

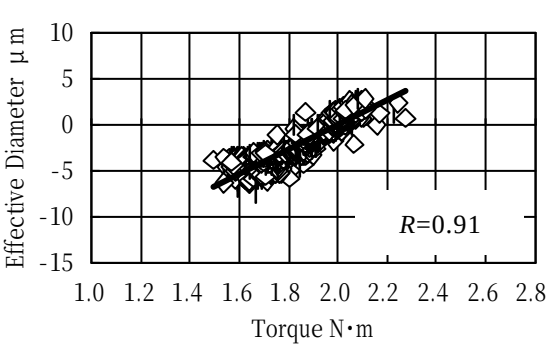
一般的な加工現場においては、簡易的に有効径を測定するためにダイヤルコンパレータに鋼球を２つ取り付けたもので測定している。しかし、いずれの方法においても、手作業による測定であるため、有効ねじ部長さの数カ所でしか測定・検査を行っていない。また、ボールねじ軸、ピンゲージおよびマイクロメータの相対関係を安定にして高精度な測定を行うことは、熟練作業者でなければ困難である。本研究では、有効ねじ部長さ全体に渡って有効径の変動を連続的かつ高精度で測定する有効径自動測定器を開発した。

５．１　三針法と三点法

これまで説明した三針法は、真円度測定においては直径法に分類される。従って、ボールねじ軸１回転における有効径変動の周波数成分の内、奇数山成分は検出することができない。そこで、本研究では、従来の有効径測定における三針法の代わりに、三点法を採用する。この方法は、３つの変位センサの設置角度を適当に設定することで、全ての周波数成分



a)ラッピング前



b)ラッピング（10 サイクル）後

図６　有効径とラップトルクの相関関係

を測定できる特長をもつ。また、信号処理によって偏心成分はキャンセルされるので、ボールねじ軸のそりやセンタの振れなどに起因する誤差成分は取り除くことができる。

５．２　三点法に基づく有効径自動測定器

図７に製作した有効径自動測定器を示す。ピンゲージはボールねじに組み込まれる鋼球と等しい径を持っている。そして、板ばねで支持・案内されているので、ねじ軸の半径方向に対してのみ、摩擦無く滑らかに、かつ平行に変位する。そして、ピンゲージはねじ軸に対して３方向から押し当てられる。ピンゲージの変位は、電気マイクロメータによって測定される。測定ユニットの設置角度は、１本が水平で、他の２本がそれぞれ 32°、15° の設置角度となっている。この設置角度によって、有効径変動の周波数成分で特に重要となる低周波成分（2～10 山成分）は全て測定が可能になる。

５．３　有効径測定実験

各変位計の測定結果から、三点法に基づいて有効径変動を算出した結果を図８に示す。これより、試料ボールねじは中央部分が凸である傾向があり、その変動幅は 30μm 程度であった。この特徴は従来の三針法を用いた手動測定においても確認されており、測定結果は妥当であると考えられる。次に、その結果をボールねじ軸一回転における有効径変動の周波数成分として算出した結果を図９(a)に示す。また、三針法を用いて同じ試料ボールねじを測定した結果を図９(b)に示して比較する。これより、三点法の測定においては、三針法では検出することのできない、3 および 5 山成分を見ることができた。

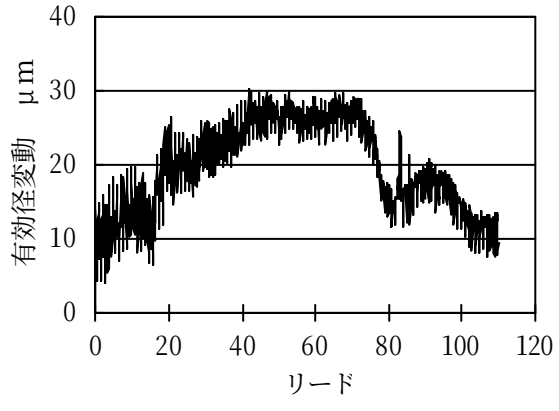


図８　有効径変動測定結果

６　熟練作業者を模したラッピング

６．１　ラッピング加工パターン

熟練作業者は、ラップ工具の保持トルクを手で感じ取りながら、ひっかかりやトルクの大きい部分を集中にくり返しラッピングを行い、効率的にラップ

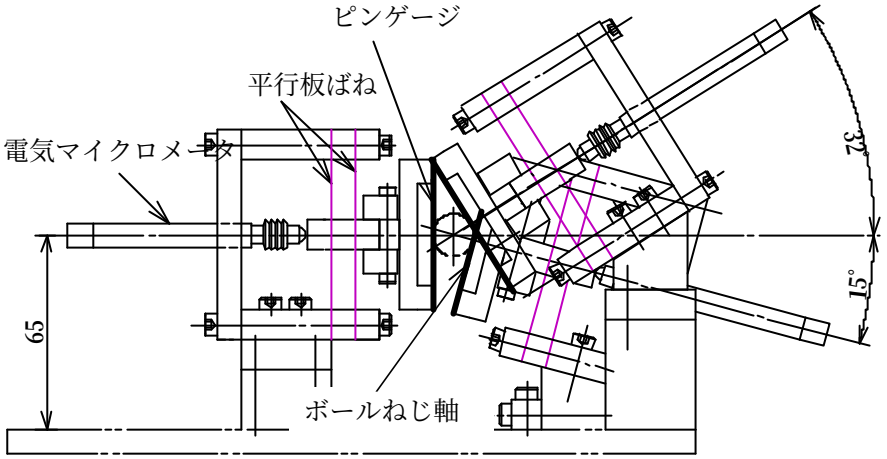
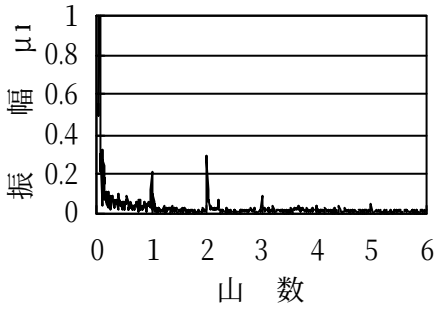
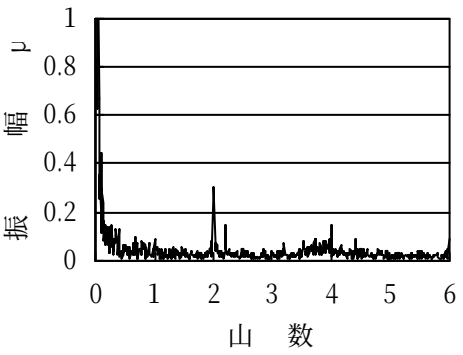


図７　三点法有効径自動測定器



(a) 三点法による測定結果



(b) 三針法による測定結果

図９　よろめきの周波数成分

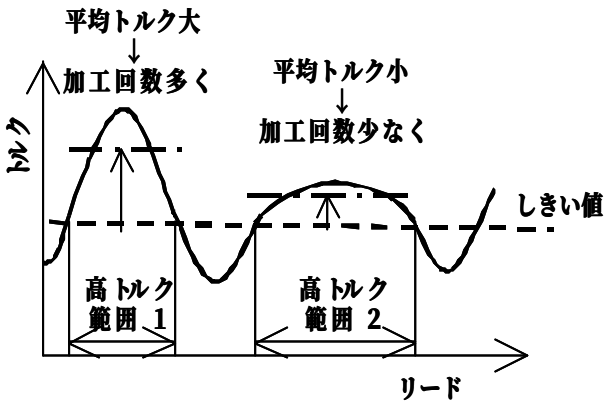
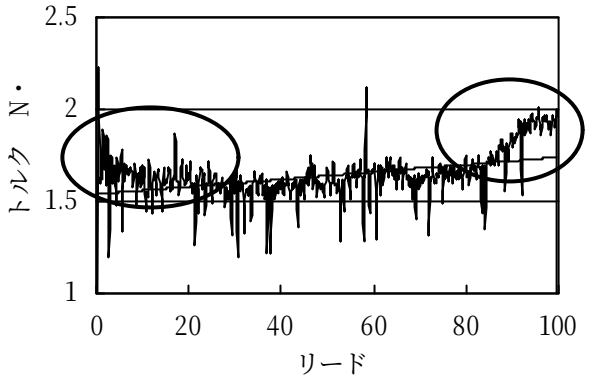


図１０　トルクと加工範囲・回数の関係

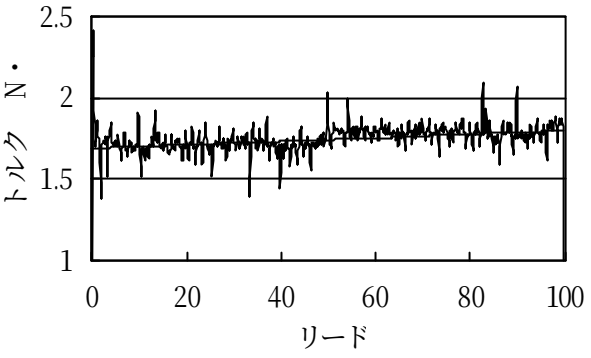
トルクを平均化していく。その方法は、経験と勘に頼られているが、ここでは自動化を目指して加工パターンを作成して、ラッピングを行う。図１０は、トルク変動曲線を示し、しきい値は最小二乗近似直線とする。しきい値よりも高いトルクが検出された部分を加工すれば良いが、平均トルクがより高い範囲、すなわち範囲２よりも範囲１の加工回数を多くすることで、より短時間でトルク変動の平坦化を図る。

６．２　ラッピング結果

図１１にラッピング前後でのトルク変動の違いを示す。ラッピングは上述のラッピングパターンに従って、２サイクルの加工工程（約１０分間）を行った。図中の直線が最小二乗法で引かれたしきい値である。ラッピング前には、○印で囲まれた領域のトルクがしきい値よりも大きいため、重点的にラッピングが行われた。その結果、図１１(b)に示すように、全体的に平坦なトルク変動を得ることができた。



(a)　ラッピング前



(b)　ラッピング後

図１１　自動ラッピングによるトルク変動の平坦化

7　結　　論

本研究では、熟練作業者の経験と感覚に委ねられていたボールねじ軸のラップ作業を自動化した。さらに、よろめき補正可能な新型工具を開発して、加工実験を行い、以下のような結果を得た。

１　円筒ラッピングの理論に従い、６個のラップ歯を持つ新型ラップ工具を開発した。加工実験を行った結果、短時間で移動量誤差を修正できることが確認された。

２　ラップトルクと移動量誤差および有効径変動に相関関係があった。

３　三点法に基づく有効径自動測定装置を開発した。この結果、１リードあたりの移動量変動の全ての周波数成分を測定できた。

４　熟練作業者を模したラッピングパターンによって加工実験を行った結果、短時間でトルク変動を平坦にすることができた。

以上の結果、提案したラップ仕上げの自動化装置ならびによろめき補正が可能な新型ラップ工具を用いることで、高精度なボールねじ軸のラッピングを比較的簡単に行うことが可能になると考えられる。ここで開発された技術は、精密加工、生産技術分野において、非常に有効であると考えられる。