

精密転造加工における型転写精度に関する基礎的研究

神奈川工科大学 自動車システム開発工学科

助手 加藤俊二

(平成 15 年度研究開発助成 A F - 2003007)

キーワード：流体動圧軸受、転造加工、溝成形、傾斜溝

1. はじめに

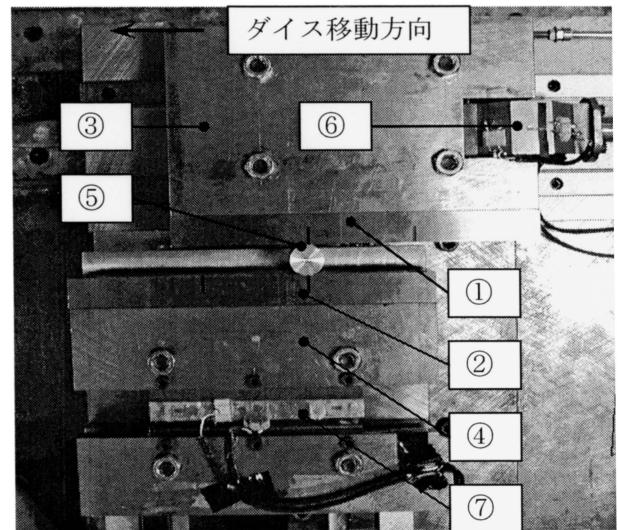
ハードディスクドライブの高性能化のためにドライブに使用されているスピンドルモータに高精度高速回転が求められている。この要求を満たすためにスピンドルモータに使用されている軸受に従来のボールベアリングに代わり流体動圧軸受が採用されつつある。流体動圧軸受部品は切削加工あるいは放電加工で製造されているためコストが高く、また生産性に問題がある。そこで塑性加工によって製造できれば生産性の向上やコストの低減が望める。これらのうち、スラストベアリングについては、超精密プレス加工で製造が可能であると考えられているが、シャフトについては殆ど検討がなされていない。

そこで本研究では、ねじ・歯車の加工に用いられている転造加工で動圧軸受用シャフトに溝付けを行うことを提案する。このシャフトは2~3mmの軸に5~10 μ m程度の溝付けを行う必要があるが、加工条件が溝の成形に及ぼす影響を検討するため、実部品の約10倍のモデルを用い、平転造装置を試作し加工実験を行った。また、実部品は中空シャフトであり、中空軸の転造に関する研究はほとんどなされていないので、この点についても実験的に明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

2. 1 実験装置

実験に用いた転造加工装置を図1に示す。この装置は試験片に押付荷重（転造圧力）を加える部分と回転運動を与える（ダイスを平行運動させる）押込み部からなる。ダイス①、②の間に試験片⑤をセットし所定の押付荷重を加え図左方向にダイス①を移動して加工を行う。このときの荷重は荷重計⑥および⑦で、ダイスの変位はブロック③に取り付けた変位計で測定できるようにしている。実験に用いたダイスの設計図を図2に示す。A-A断面上の溝の幅は0.637mm、溝から溝までの距離は0.717mm、溝深さは約60 μ mである。図のダイスと左右逆向きのダイスを上下に組み合わせ1組とし、押込み部および押付部のダイス固定用ブロックに取り付け実験に用いた。なお、試験片押付部は図3に示すようにダイス固定部と押付荷重付加部に分かれており、間に荷重計が取り付けられている。転造装置の機構上、加工中に荷重点が左方向に移動するため、見かけ上の荷重が変化する可能性がある。そこで図に示すA、B、



①、②ダイス ③ダイス固定用ブロック（押込み部）
④ダイス固定用ブロック（押付部） ⑤試験片
⑥荷重計（押込み荷重） ⑦荷重計（押付荷重）

図1 転造加工装置

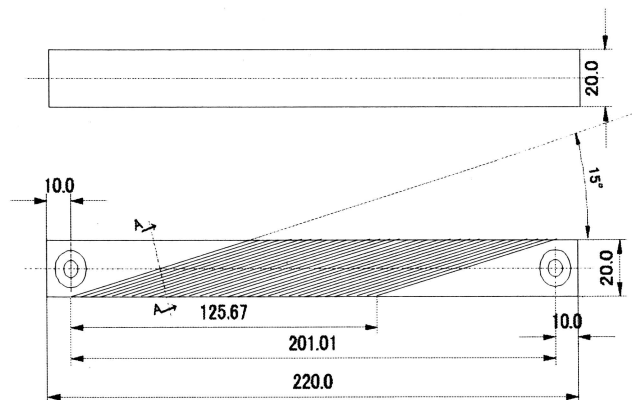


図2 ダイス設計図

CおよびBC間に荷重をかけ、ひずみゲージ①、②、③における荷重と出力電圧の関係を求めた。その結果①、③のひずみゲージの出力は荷重位置によって大きく異なるが②のゲージの出力はほぼ一定であることを確認している。また、加工中の押付荷重、押込み荷重、変位はデータレコーダーに記録される。

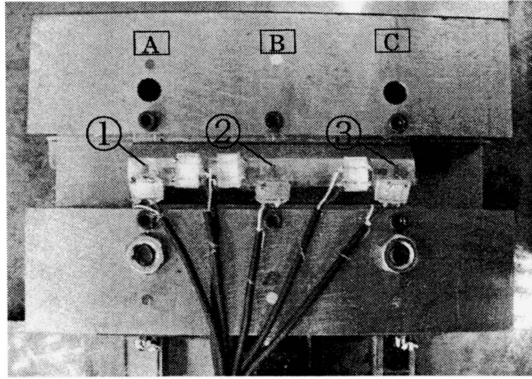


図3 押付荷重測定部

2. 2 実験方法

押し込み部の移動量の半分が試験片外周の移動距離である。通常のねじ転造の場合、素材の転がり数は $5 \sim 8$ ¹⁾に設定されるが、本研究では、成形される溝が浅いことおよび加工する材料が比較的やわらいことから、試験片の転がり数は1または1/2とした。転造により成形される傾斜溝は試験片が半回転する場合、ダイス①、②でそれぞれ半周分づつ成形され、1回転する場合にはそれぞれ1周づつ、計2回溝が成形せれる。押し込み速度は11mm/secで一定とした。

2. 3 溝深さの測定

図4に溝深さ測定装置を示す。精密自動ステージ(中央精機(株)製PS-120、最小移動量 $1 \mu\text{m}$)と高性能レーザー変位計((株)キーエンス製LT-9500、分解能 $0.01 \mu\text{m}$)を組み合わせたものを用いた。溝が成形された試験片を測定台上に載せ、試験片長手方向に表面形状を測定した。測定は試験片を 90° づつ回転させ4箇所を行った。溝深さは隣り合う凹凸の差として整理した。

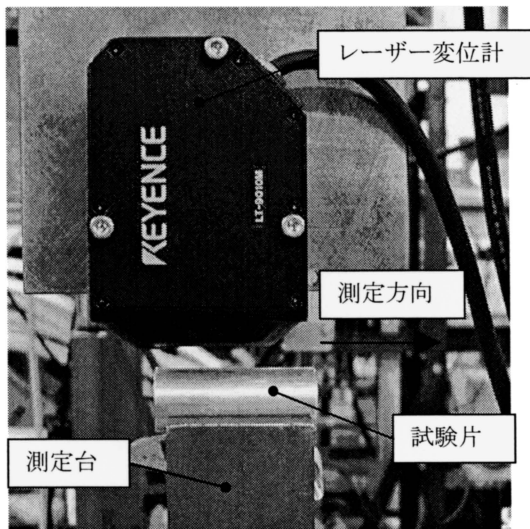


図4 溝深さ測定装置

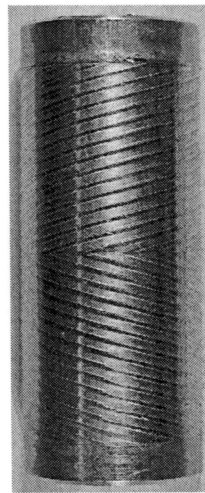
3. 実験結果および考察

3. 1 材質の違いによる加工性への影響

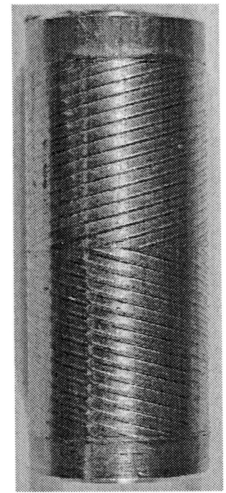
材料の機械的性質の違いによる加工性の違いをみるために試験片材質としてA1070とA5056を用いた。実験に用いた材料の機械的性質を表1²⁾に示す。外形寸法は $\phi 20 \times 50\text{mm}$ とし、素材の転がり数を1とした。押し荷重は予備実験の結果からA1070の場合、1000N、2000Nとし、A5056の場合3000N、4000Nとした。

表1 押出棒の機械的性質²⁾

材質	質別	引張強さ [N/mm ²]	耐力 [N/mm ²]	伸び [%]
A1070	H112	55以上	15以上	—
A5056	H112	245以上	100以上	—

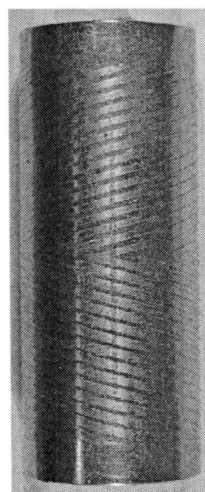


(a) 1000N

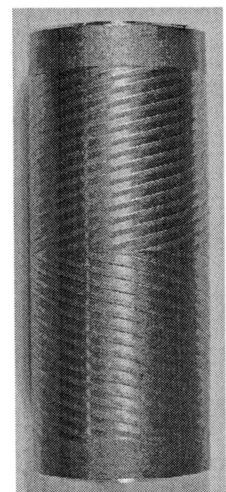


(b) 2000N

図5 転造後の試験片(A1070)



(a) 3000N



(b) 4000N

図6 転造後の試験片(A5056)

各実験条件による加工後の試験片の写真を図5～図6に示す。この写真からA1070の場合、試験片外周上にほぼ一様に溝が成形されていることがわかる。A5056の場合、溝が成形されるが十分な深さまで達していない。

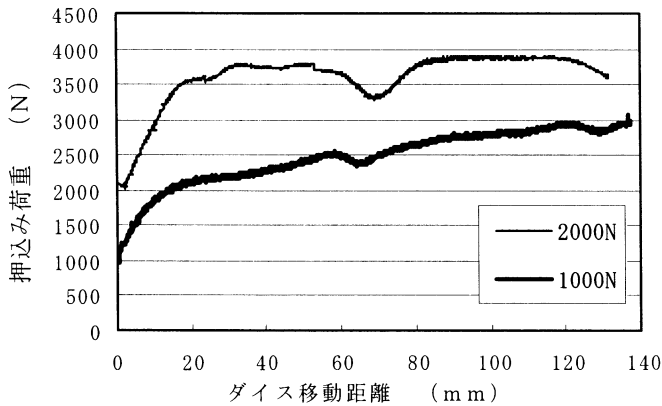


図7 押込み荷重－ダイス移動距離の関係 (A1070)

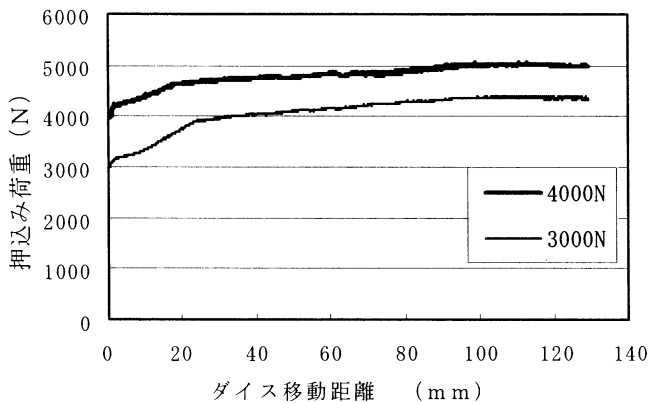


図8 押込み荷重－ダイス移動距離の関係 (A5056)

図7は試験片材質をA1070、押付荷重を1000N、2000Nとした場合のダイス移動距離と押付荷重の関係について示したものである。この図から加工が進むにしたがって押付荷重が増加することがわかる。加工開始からダイス移動距離約20mm(円周上では10mm)まで急激に荷重が増加し、その後、徐々に増加する。移動距離63mm付近で一度荷重の凹がみられるが、これは試験片が半回転し、外周全面に溝が成形されたためだと考えられる。この転造加工では溝が軸方向に対して約75°に成形され、また工具の成形角が90°であるため、材料の流れは半径方向と考えられる³⁾。このため成形が進むと試験片の径が大きくなり荷重が増加すると思われる。

半回転後、やや荷重が増加するのはここで2度目の溝成形(1度成形された溝をさらに深くする成形)が行われるためだと考えられる。押付荷重が1000Nの場合は上記の理由で半回転後も荷重が増加するが、2000Nの場合、後半の半回転開始後にやや荷重が増加するがその後ほぼ一定

となる。これは1回の加工でほぼ所定の深さまで溝が成形されているためだと考えられる。

図8は材質をA5056とした場合のダイス移動距離と押付荷重の関係について示したものである。3000N、4000Nどちらの場合もA1070のような荷重の増加が見られない。また半回転後の荷重の落ち込みもみられず、その後単調に増加する。これは溝深さの測定結果(後述)から溝成形が所定の深さまで行われず、成形途中であるためであると考えられる。A5056材に所定の深さまで加工を行うには初期押付荷重を大きくするか素材の転がり数を増やす必要がある。

図9は転造加工終了後のA1070試験片の表面を軸方向に測定した結果の一部を拡大したもので押付荷重1000N、2000Nともにダイスの深さまで溝が加工されていることがわかる。この結果から試験片を1回転して溝を成形する場合、押付荷重は1000Nでよいことがわかる。

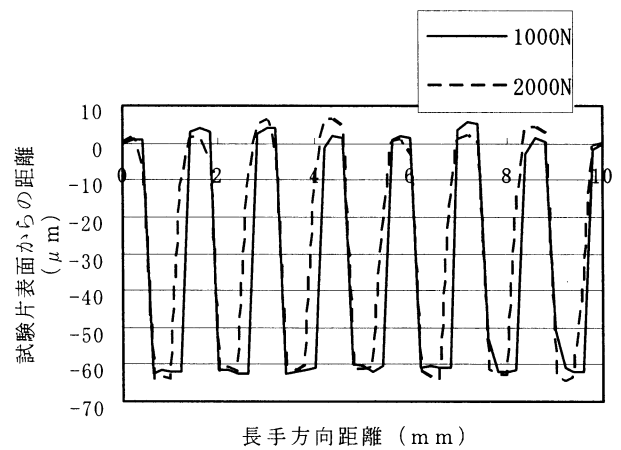


図9 試験片長手方向溝深さ (A1070)

表2に材質および押付荷重の違いによる溝深さの平均値を示す。A1070の場合は荷重1000Nですでにダイスの深さまで溝が成形されている。A5056の場合は押付荷重が大きいほうが溝深さが深くなっているが、ダイスの溝深さまで達していない。ダイスの溝深さまで溝成形を行うためにはさらに大きな荷重で押し付ける必要がある。

表2 溝深さの平均値

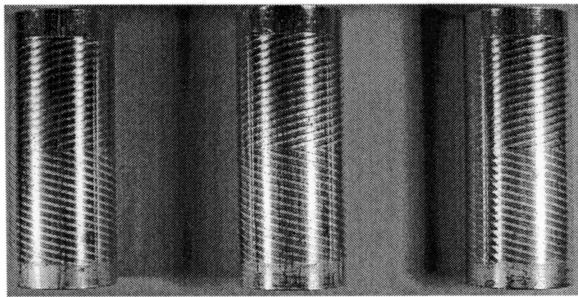
試験片材質	A5056		A1070	
押付荷重 (N)	3000	4000	1000	2000
溝深さの平均値 [μm]	27.1	33.8	62.6	62.5

3. 2 試験片形状の違いによる溝成形性へ影響

試験片は、材質をA1070、外形寸法は前項の実験と同じとした中実円柱と中空円柱(内径5、8mm)の3種類を用いた。前項の実験で押付荷重1000Nで溝が十分成

形されていることから、押付荷重は500N、1000N、1500Nとした。

図10に中実、中空5mm、中空8mmを押付荷重1000Nで加工した試験片の写真を示す。試験片の内径に関わらず試験片外周上にはほぼ一様に溝が成形されている。500N、1500Nの場合も同様に溝が成形されるが、500Nの場合、溝がやや浅くなる。



(a) 中実 (b) 中空φ5 (c) 中空φ8
材質A1070、押付荷重1000N

図10 転造後の試験片

図11、12、13はそれぞれ押付荷重500N、1000N、1500Nとしたときのダイス移動距離と押付荷重の関係について示したものである。これらの図から中実、中空5mm、中空8mmともほぼ同じ傾向を示すことがわかる。この結果より内径が8mm程度では中空にした影響はないと考えられる。図14は中実の試験片を押付荷重500N、1000N、1500Nで加工したときのダイス移動距離と押し込み荷重の関係について示したものである。なお、中空5mm、中空8mmの場合もほぼ同様の傾向を示す。

初期押付荷重が500Nの場合、押付荷重は試験片の回転とともに加工終了までほぼ単調に増加する。

初期押付荷重が1000Nの場合、押付荷重は1000Nから2200N程度までほぼ単調に増加し、押付荷重の増加分は500Nの場合より大きくなる。これは成形される溝深さが500Nの場合よりも深くなるため試験片の外形が大きくなるためだと考えられる。このときの押し込み荷重は500Nの場合と同様に加工開始から終了までほぼ一定の値をとるが半回転直前に低下する。これはダイスによる溝成形が1回の接触ではぼなされるので半回転終了まえにすでに成形された溝が型と接触するために、ここで溝成形のための塑性仕事が行われないためだと考えられる。この傾向は押付荷重が大きくなると顕著になる。

初期押付荷重が1500Nの場合、押付荷重は加工終了時には3500N~3700Nとなり、押付荷重の増加は1000Nの場合よりもさらに大きくなる。このときの押し込み荷重は500N、1000Nの場合と同様に加工開始からほぼ一定の値をとり半回転直前に低下するが、1000Nの場合の約2倍となる。この理由は押付荷重が溝成形に必要な荷重以上にな

ると、試験片の断面形状が楕円状に変形し、試験片を押し込むための抵抗が増加するためだと考えられる。

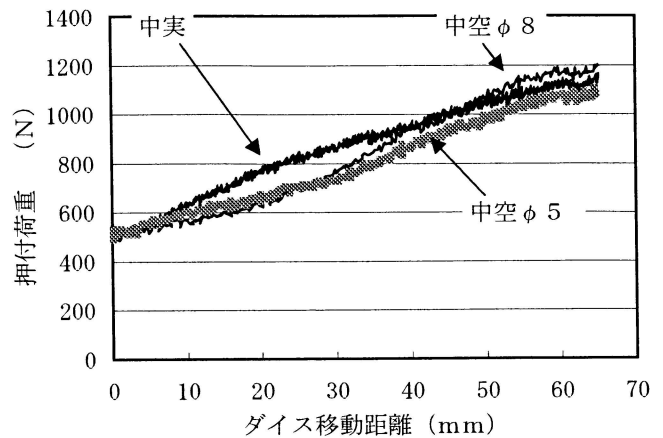


図11 押付荷重-ダイス移動距離の関係
(押付荷重 500N)

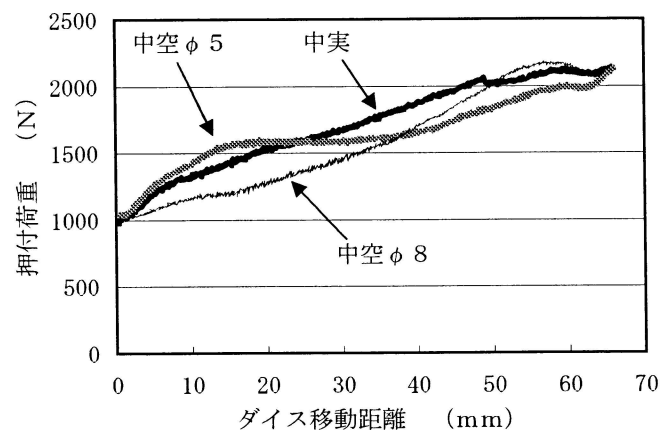


図12 押付荷重-ダイス移動距離の関係
(押付荷重 1000N)

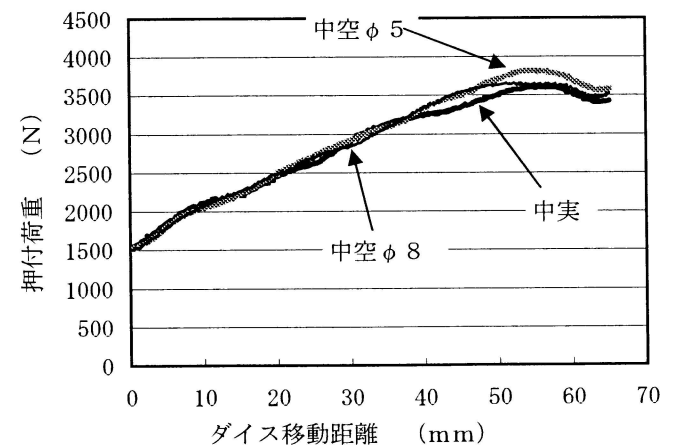
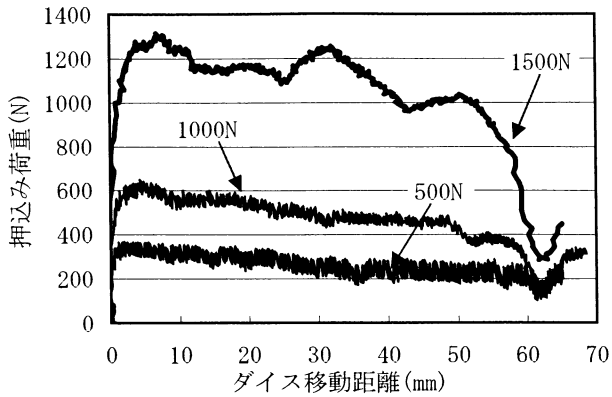


図13 押付荷重-ダイス移動距離の関係
(押付荷重 1500N)



試験片形状：中実、押付荷重：500N, 1000N, 1500N

図14 押込み荷重—ダイス移動距離の関係

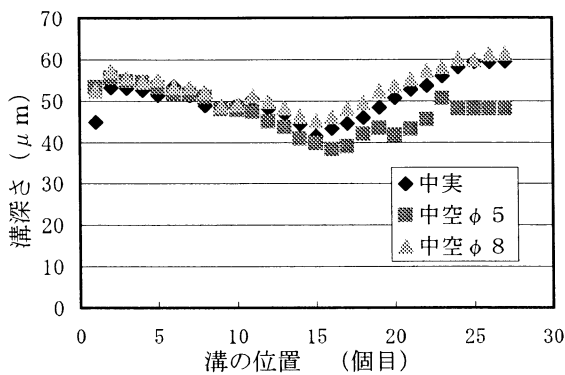


図15 試験片長手方向の溝深さ（押付荷重500N）

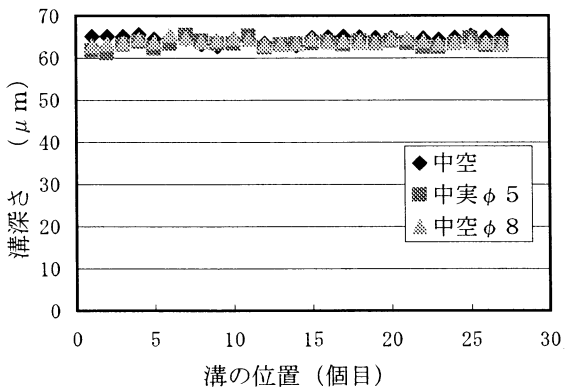


図16 試験片長手方向の溝深さ（押付荷重1000N）

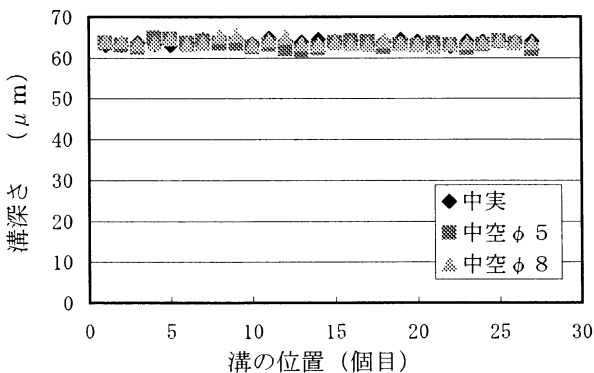


図17 試験片長手方向の溝深さ（押付荷重1500N）

図15～17は加工後の試験片表面を長手方向（軸方向）に測定し、隣り合う凹凸の差を溝深さとして整理したものである。これらの図から押付荷重1000N、1500Nの場合中実、中空にかかわらず、溝が長手方向にほぼ均等に成形されていることがわかる。押付荷重500Nの場合、成形された溝はダイスの深さまで達していない。また、試験片中央部で溝が浅くなっているが、これはダイスが試験片の長手方向に2分割された構造で、取り付け時にくぼんでしまったためである。この結果より十分な押付荷重で試験片を押さえつけた場合ダイスの取り付け角度の誤差の影響を受けないことがわかる。

4. まとめ

- (1) 実部品の約10倍のモデルの流体動圧軸受のシャフト部に平転造により傾斜溝を成形する装置を試作し、ダイスの溝深さまで溝付けができることを確認した。
- (2) 実験材料として純アルミニウムA1070を用いた場合、試験片を半回転させる（溝成形は円周上で1回）ことでダイスの溝形状を転写できる。これは通常のねじ転造と異なり成形される溝深さが素材直径に比較して小さいために、ダイス1回転の食い込みで十分な溝成形がおこなわれるためである。
- (3) 溝成形における素材の塑性流動は傾斜溝が素材長手方向（軸方向）に対して約 7.5° 傾いており、また、ダイスの軸方向に対する成形角が約 9.0° と成るため半径方向流れとなる。このため転造加工の進展とともに押付荷重が増加し、溝成形が終了すると押付荷重は増加しなくなる。
- (4) アルミニウム合金A5056を用いた実験では実験の範囲ではダイスの溝深さまで溝成形が行えなかった。この素材に十分な深さの溝成形を行うためには押付荷重を大きくするか試験片の転がり数を増す必要がある。
- (5) 実部品を模した中空軸について加工実験を行った結果、実験の範囲では中実軸と溝の成形性に違いは見られなかった。

5. 今後の課題

- (1) 押込みの速度制御および位置決め制御を精密に行うために押込み部を油圧シリンダーからサーボモーターに変更する必要がある。
- (2) 転造加工中の試験片の変形挙動を推定するために押付荷重による半径方向の変形量と回転方向の接触幅を測定する必要がある。
- (3) 低周波振動を付加して塑性加工を行うと加工力の低減、加工精度の向上が期待できる。この加工法を本研究で提案した転造加工装置に適用し、加工性および加工精度の向上を試みる。

謝 辞

本研究の一部は天田金属加工機械技術振興財団の助成によって実施されたことを付記するとともに、同財団に深く感謝いたします。また、実験に協力された本学学生、高橋章恭、宮崎廉太郎、岡田昇平並びに長倉浩君に謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本塑性加工学会編：転造加工，(1990)，29，コロナ社.
- 2) 日本規格協会編：JIS ハンドブック非鉄，(2002)，403.
- 3) 前傾 1)，7.