アンダレース潤滑スピンドルの高速回転特性の解析と評価*

中村晋哉** 垣野義昭*** 浦野好市† 米山博樹††

An Analysis and a Performance Evaluation of the Under-Race
Lubrication Spindle at a High Speed Rotation

Shinya NAKAMURA, Yoshiaki KAKINO, Koichi URANO and Hiroki YONEYAMA

This paper deals with the temperature and thermal deformation performance of the machine tool spindle with high speed and under-race lubrication. As a result of measurement on rotating test, under-race jet lubrication has succeeded in rotating at a 20000 min^{-1} ($d_{mn}=2.5 \times 10^6$) and achieved a high precision on a small thermal deformation by oil cooling of the spindle inside, and also achieved a smaller power loss than usual oil-jet lubrication, because the amount of lubricant used was much less than that of usual oil-jet lubrication system to get the same speed. In the same way under-race oil-air lubrication achieved a higher rotational speed than usual oil-air lubrication, and also achieved a further high rotational speed by using ceramic ball bearings. Analysis of preload increment showed that oil cooling of the spindle inside is better than the use of ceramic ball bearings in terms of preload restraining effect.

Key words : machine tool spindles, under-race lubrication, oil-jet lubrication, oil-air lubrication, ceramic ball bearings, heat flow analysis, thermal deformation, preload increment

1. 緒 言

最近の工作機械の高速化・高精度化が急激に進む中で、とりわけMC主軸の高速化はめざましいものがある。ここ数年で高速軸受として玉のみをセラミックスとしたセラミック球アンギュラ玉軸受が開発され、潤滑法では表1に示すようにグリース潤滑法や微量の潤滑油を定量で給油するオイルエア潤滑法が開発され、あるいは大量の潤滑油を強制的に給排油するジェット潤滑法が開発され、 d_{mn} 値 200×10^4 以上が実現されている¹⁾。現在ではそれらを組み合わせて、切削加工や研削加工など用途に応じて必要な超高速化が可能になっている。

切削機の主軸には定位予圧が使用されることが多い。これを従来のオイルエア潤滑の下で用いた場合、高速回転すると予圧が増加するので初期設定予圧を小さくせざるを得ず、低速回転で剛性が低くなり、低速から高速までの広範囲での切削加工が困難となっている。したがって、一方では予圧切換え²⁾や予圧可変³⁾などの予圧制御型のスピンドルも開発されている。予圧の増加の主な要因は回転により生じる軸受の発熱によって軸受内外輪の温度差が大きくなり、特に内輪側の温度が高くなることと考えられている⁴⁾。またジェット潤滑は超高速回転が可能であるが、回転中の消費動力が非常に大きいという欠点があり、あまり一般に使用されていない状況にある。

そこで本研究ではスピンドルの軸及び軸受内輪側から冷却した潤滑油を供給し、内外輪温度差を小さく抑えて予圧の増加を

抑制し、しかも軸方向熱変位を小さくする軸芯冷却の効果も兼ね備えたアンダレース潤滑法について、高速回転時の温度特性の評価実験を行い、さらに一層の主軸の高速化・高精度化を図るための基礎としようとしている。

2. アンダレース潤滑の特徴と熱流解析

アンダレース潤滑は軸受内輪に給油孔を設け、軸側から潤滑油を供給するが、大量の潤滑油を強制的に給排油するジェット潤滑タイプと微量の潤滑油を供給するオイルエアあるいはオイルミスト潤滑タイプの2方式がある。

2.1 アンダレースジェット潤滑

軸受1個あたり2~4 L/minの温度制御された大量の潤滑油を供給するため、軸及び軸受内輪が十分に冷却され、ハウジング側ジャケット冷却と併用すると熱変位もかなり小さく抑えられ、

Table 1 Comparison of different lubrication systems

Grease lubrication	Oil-air lubrication	Oil-jet lubrication
Max d_{mn} : $0.8-1.0 \times 10^6$	Max d_{mn} : $2-2.5 \times 10^6$	Max d_{mn} : $2.5-3 \times 10^6$
Advantages: ·no splash ·dissipation ·build up of the optimal lubrication film ·no lubrication system ·simple construction ·no effort for lubricant guidance ·pipes	Advantages: ·no splash ·dissipation ·build up of EHD lubrication film Disadvantages: ·instable lubrication particularly at high speeds ·additional dosage unit needed ·highly complex guidance of oil-air supply pipe to each bearing	Advantages: ·possibility of cooling by adjustment of quality ·lubrication film build up is assured ·no environmental contamination Disadvantages: ·high splash ·dissipation ·additional oil cooling could be necessary ·oil return line difficult to construct ·foam at high speed rotation
Disadvantages: ·change of grease after 1000-5000 working hours ·seal could be necessary		

*原稿受付 平成6年3月17日

**正 会 員 日本精工(株) (前橋市鳥羽町78)

***正 会 員 京都大学工学部 (京都市左京区吉田本町)

†正 会 員 関東精機(株) (前橋市大渡町2-1-10)

††日本精工(株)

Fig.1 Structure of under-race spindle unit

高速回転だけでなく高精度化も期待できる。しかし、多量の潤滑油を使用するため回転時の消費動力が大きくなる欠点があるので、従来のハウジングから潤滑油を供給するジェット潤滑に対してどの程度の改善が可能かを検討する必要がある。

2.2 アンダレースオイルエア潤滑

軸受1個あたり0.03cm³の潤滑油を4～8minに1回ほど給油し、回転継手で1か所にまとめ、軸内で分配して空気とともに供給するので、軸及び軸受内輪の冷却効果はジェット潤滑タイプより小さいが、回転時の消費動力が小さく、軸受内輪側から潤滑油を噴出するので高速回転になるほど遠心力によって潤滑油が供給しやすくなり、従来のオイルエア潤滑よりさらに高速化が期待できるので、その効果を明らかにする必要がある。

2.3 スピンドル仕様

スピンドル仕様は立形MC用で軸端NT50、軸径100mmでジェット潤滑タイプでは最高回転速度20000min⁻¹(d_{mn} 値250×10⁴)であり、オイルエア潤滑タイプでは最高回転速度10000min⁻¹(d_{mn} 値125×10⁴)とする。図1に示すように軸受配列は4列の定位置予圧のDBB組合せ、予圧荷重400Nとし、軸の後端に潤滑油供給用の回転継手を設け、軸の肉厚部に軸受別に供給用長穴をあけ、その穴を通じ、それぞれ軸受内輪のノズルから潤滑油を供給する。

ジェット潤滑の場合は動粘度1.58mm²/s-40℃の潤滑油を使用し、ハウジング側から強制的に排油して潤滑油が外に漏れないような構造とし、オイルエア潤滑の場合は動粘度32mm²/s-40℃の潤滑油を使用し、強制的に排出しない。モータの最大出力は17.5kWであり、ハウジングの外側はブラケット取付け時にジャケット冷却できる構造とする。またテーパ側の先端軸受についてはハウジングに温度測定用の穴を設けている。

2.4 熱流解析

前報のモータビルトインスピンドルの熱伝導解析⁵⁾において、FEM解析結果、熱流解析結果と実測された温度分布を比較し、スピンドルの熱解析として熱流解析が有効であることが分かった。したがって、本研究においても同様にアンダレース潤滑の際の熱流解析を行う。

スピンドルの構成要素やスピンドル取付部、定盤などについて図2のような簡単なモデル化を行い、発熱量と熱抵抗におきかえた熱抵抗回路網⁶⁾を図3に示す。軸受からの発熱量を Q とおいて軸部への伝熱を Q_1 、ハウジング部への伝熱を Q_2 、軸受

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_1'$$

Fig.2 Heat flow model of unit

Fig.3 Heat flow circuit of spindle unit

部の潤滑油により奪う熱量を Q_3 、ジャケット冷却により奪う熱量を Q_4 、さらにアンダレースジェット潤滑の場合、潤滑油の軸芯冷却により奪う熱量を Q_1' とおく。熱抵抗は温度によって変化しないと仮定し、部品間の接触部の熱抵抗は無視して軸受部熱抵抗を R_B 、軸部熱抵抗を R_{SWF} 、外筒部熱抵抗を R_{HW1} 及び R_{HW2} 、取付けブラケットを R_{HW3} などとおく。

オイルエア潤滑のエア冷却効果は可逆断熱効果による温度効果を加味して冷却容量を求め、ジェット潤滑はハウジングの潤滑油の供給穴における油による強制対流とし、アンダレースジェット潤滑は軸側の供給穴における油による強制対流としてそれぞれの熱抵抗を計算する。

回路方程式はスペースの都合で省略するが、熱抵抗回路網を基本形に等価変換し、オイルエア潤滑とジェット潤滑、アンダレースジェット潤滑の場合の軸受発熱量を計算し、回路網に入力して方程式を解き、それぞれの場所の熱貫流を求めることにより、温度上昇を計算し、各潤滑法の温度特性を比較する。

次にアンダレースジェット潤滑において、軸受部の発熱がスピンドル内をどう伝熱するか解析し、ジェット潤滑との特性比

Fig.4 Experimental set-up

載を行い、その効果を確認するために熱貫流 $Q_1 \sim Q_4$ 、 Q_1' をそれぞれ求める。

3. 実験装置と方法

3.1 実験装置

スピンドル及び回転継手を図4のように取付台に垂直に固定し、平ベルト駆動を行う。ジェット潤滑タイプの場合は温度制御された潤滑油は上端の回転継手より供給し、スピンドル下側から排出して潤滑装置に戻すようにして、ハウジング側はジャケット冷却を行う。温度測定点は軸受外輪近辺A部、ハウジング外径B部、軸先端C部の3点と室温として、回転時の軸方向変位を測定するために軸先端にテストバーを付けて非接触変位計を取り付け、消費動力はモータの駆動出力から測定する。

3.2 実験方法

スピンドルのジャケット冷却は冷却油を室温同調に設定し温度制御する。その流量は5 L/minとする。ジェット潤滑タイプは鋼球軸受のみとし、オイルエア潤滑タイプについては、軸受の玉を鋼球とセラミック球の2通りに組み換えて試験する。

それぞれの条件で最高回転速度まで段階的に変えて運転し、温度平衡状態でのA、B部の温度と室温を測定し、同時に軸先端テストバーの軸方向変位と消費動力を測定して自動記録する。軸先端C部については各回転速度で温度平衡状態になったところで停止させ、直ちに表面温度計で測定する。またジェット潤滑タイプの場合は回転時の潤滑油の流量も測定する。

4. 結果と考察

4.1 熱流解析による比較

オイルエア潤滑、ジェット潤滑とアンダレースジェット潤滑の場合のB、C部の温度上昇を熱流解析によって求めた結果を図5に示す。ジャケット冷却を行うと潤滑法の違いによる温度上昇の差がはっきり分らなくなるので、ジャケット冷却なしの条件で行った。ただし総熱量 Q は実測値を用いて求めている。ハウジングB部の温度上昇を計算すると、アンダレースジェット潤滑では潤滑油の流量を軸受1個あたり2.5 L/minに対し、

Fig.5 Calculated temperature rise of spindle by heat flow analysis (without jacket cooling)

(a) Oil-jet lubrication

(b) Under-race jet lubrication

Fig.6 Analysis of heat flow rate

ジェット潤滑では3 L/minとすると同等の値が得られた。したがって、潤滑油の流量はそれぞれその値を用いることにした。

その結果、オイルエア潤滑では 10000 min^{-1} で温度上昇が40 Kを越えており、ハウジング側B部より軸C部のほうが約5 K高い結果となっている。ジェット潤滑、アンダレースジェット潤滑では 20000 min^{-1} でオイルエア潤滑の 10000 min^{-1} の温度上昇とほぼ同等になっている。またジェット潤滑ではハウジング側のほうが温度が低く、アンダレースジェット潤滑では主軸側のほうが温度が低くなっている。

ジェット潤滑とアンダレースジェット潤滑において、ジャケット冷却有りとして軸受部の発熱がスピンドル内をどんな割合で伝熱するか計算した結果を図6(a),(b)に示す。総熱量 Q を

比較すると 10000min^{-1} までは両者の間には大きな差はないが、 15000min^{-1} を越えると大きな差を生じている。この結果から、 20000min^{-1} をさらに越えるような d_{min} 値 300×10^{-4} 以上の領域ではアンダレースジェット潤滑のほうが温度上昇、消費動力ともかなり小さくなると推定できる。

両者とも軸受部の潤滑油により奪う熱量 Q_3 が最も大きい。アンダレースジェット潤滑では潤滑油の軸芯冷却によって奪う熱量 Q_1' も比較的大きいので、ジェット潤滑に比べて主軸、軸受内輪側の温度を抑制でき、その結果、回転数増加による予圧の増加を小さく抑えられる。

したがって、スピンドルの温度上昇を同等に抑えた場合に、アンダレースジェット潤滑はジェット潤滑に比べて、潤滑油量を少なくでき、その結果、軸受の発熱 Q も小さく抑えられる。さらに潤滑油温制御と潤滑油量制御とを併用することで、軸芯冷却効果及びジャケット冷却効果によって奪う Q_1' と Q_4 をともに大きくすることによって Q_1 及び Q_2 をより一層小さく抑えることが可能となる。その結果、スピンドルの温度分布が均一に近づき、スピンドルの熱変位は一層抑制される。

以上の解析結果からアンダレースジェット潤滑の高速、高精度に対する有効性が確認できたと言える。

4.2 アンダレースジェット潤滑

アンダレース潤滑の場合、回転により遠心力が増加するので潤滑油の流量制御をしないと、回転速度が高くなるにつれて軸受内輪のノズルから噴出する流量も増加する。

潤滑油の流量制御なしと流量を 2.5L/min に固定制御した場合の消費動力の比較結果を図7に示す。流量制御をしないと流量が増加し、 2000min^{-1} で 1.8L/min だったものが回転速度に応じて増加して、 18000min^{-1} では 4L/min となり、消費動力が 17.5kW となって、それ以上ではモータの定格出力を越えるので回転不可となっている。

流量を 2.5L/min 一定に制御すると、流量制御なしに比較して低速時には消費動力の差がほとんどないが、回転速度による消費動力の増加が小さく、 20000min^{-1} でも 14kW 程と小さくなり、より高速回転が可能になる。 15000min^{-1} 以上の超高速回転させるためには省エネルギーのためにも流量制御を加える必要がある。

図8に流量を 2.5L/min に固定制御した場合のA、B、C部の温度上昇を示す。ハウジング側ジャケット冷却を行うとそれぞれの温度上昇が低くなり、特にB部とC部の温度上昇がほぼ一致しており、A部がそれらより 10K 程高くなっているのが分かる。これはハウジング側の冷却だけでなく主軸側の冷却も同時にできるので、軸とハウジングの温度が近づくため、軸受の内外輪温度差も小さくできることを示している。すなわち予圧の増加が小さくなる。これが従来のジェット潤滑より潤滑油の流量を少なくしても、高速回転できる原因である。

テストバー先端の軸方向変位の測定結果を比較して図9に示す。 8000min^{-1} において $5\mu\text{m}$ とかなり小さい値となっている。 2.5L/min と一定流量制御を行った場合に比較して、流量制御なしでは 10000min^{-1} 以下の回転速度では流量が少ないので、軸側の冷却効果が小さくなり、軸方向変位が少し大きくなっている。 10000min^{-1} を越えると流量が増加するので、冷却効果が高くなって軸方向変位の値が逆転して小さくなっている。これより回転速度と変位の関係は流量として適当な範囲があり、回転速度に応じて最適な流量に変可制御することが有効であることを示している。また従来のハウジング側から潤滑油を供給する

Fig.7 Power loss of spindle (jet type)

Fig.8 Temperature rise of spindle unit (jet type)
Constant control of flow amount

Fig.9 Axial displacement of spindle (jet type)

ジェット潤滑⁷⁾に比較すると、軸径 100mm で回転速度が同じ場合で比較・換算して、潤滑油流量が 20% 程度少なくても温度上昇が同程度になると判断できる。従来のジェット潤滑より消費動力が小さく、さらに高速化が可能であると言える。

4.3 アンダレースオイルエア潤滑

オイルエア潤滑タイプにおいて潤滑油の供給間隔を 4min と 8min に設定した場合のハウジング外径B部の温度上昇を比較した結果を図10に示す。供給間隔 4min と 8min では温度上昇にあまり差がなく、鋼球とセラミック球を比較すると 4000min^{-1} 以上の回転域になるとセラミック球の方が温度上昇がかなり小さくなっている。鋼球では温度上昇は 8000min^{-1} で約 35K となるが、セラミック球では約 20K となっており、さらに 10000min^{-1} も回転可能となっている。ジャケット冷却を行うとさらに温度上昇が小さくなっている。

従来のハウジング側から潤滑油を供給するオイルエア潤滑より本方式の方がより高速回転可能と判断できるが、軸側の冷却

Fig.10 Temperature rise of under race oil-air lubrication

がエアであり、ジェット潤滑タイプのような冷却効果が得られないので、同じ予圧荷重とするとジェット潤滑タイプの約50%の高速性しか得られていない。したがって、オイルエア潤滑タイプでは冷却効果が小さい分、低温度上昇に対するセラミック球の予圧の増加抑制による効果の割合が大きく現れると言える。

回転時の軸方向変位と消費動力の測定結果図についてはスペースの都合で省略するが、軸方向変位は 8000min^{-1} においてジャケット冷却なしで約 $37\mu\text{m}$ となり、冷却有りでは $22\mu\text{m}$ となっている。従来のオイルエア潤滑より熱変位が小さいと判断できる。しかし、図9のジェット潤滑タイプでは 2.5L/min 流量制御で約 $5\mu\text{m}$ となっており、潤滑油の冷却効果によりジェット潤滑タイプの方がかなり小さい結果が得られている。消費動力は 8000min^{-1} で $1\sim 2\text{kW}$ であり、図7と比較するとオイルエア潤滑タイプの方が回転の撓み抵抗が小さいと考えられ、消費動力がかなり小さい値となっている。

本結果から超高速回転、熱変位を小さく抑えることを重視する場合はジェット潤滑タイプが適し、ある程度的高速・高精度で省エネルギーを重視するにはオイルエア潤滑タイプが適していると言える。

4.4 回転による予圧増加の比較

アンダレースジェット潤滑の場合、温度上昇や熱変位が小さいので主軸側の冷却効果によって予圧の増加が小さいと推定できる。正確を期すために回転時の予圧の増加を解析し、オイルエア潤滑タイプと比較する。回転時における予圧の増加の計算式⁴⁾に温度上昇の測定結果や軸受諸元などを入力し、それぞれの方式に対して各回転速度における予圧の増加を計算した結果を図11に示す。初期設定予圧が 400N に対し、オイルエア潤滑タイプの鋼球仕様では約 8000min^{-1} で予圧が 4kN を越えるが、セラミック球仕様では約 9000min^{-1} で予圧 4kN を越える。ジェット潤滑タイプにおいては 8000min^{-1} では鋼球仕様で予圧が 1.5kN であり、セラミック球では予圧が 1kN となり、予圧の増加がかなり小さい。さらに 20000min^{-1} では予圧が 4kN となり、オイルエア潤滑タイプに対して約2倍の高速回転が可能であることが分かる。すなわち軸側の冷却がスピンドルの熱変位を小さく抑えるだけでなく、予圧の増加を防止することによって、高速性に対して非常に有利である。それは図11より判断して、セラミック球を用いた予圧の増加抑制よりも効果が数倍大きくなっている。

Fig.11 Comparison of preload increase on rotating

5. 結 論

アンダレース潤滑に対し、ジェット潤滑タイプとオイルエア潤滑タイプの性能比較を行い、熱流解析と予圧の増加を解析した結果、次のことが分かった。

- (1) アンダレースジェット潤滑では d_{min} 値 250×10^{-4} の回転が得られ、従来のハウジング側から潤滑油を供給するジェット潤滑より流量が少なく同程度の回転が可能であるので、消費動力が少し小さくできる。
- (2) 潤滑油の軸側の冷却効果によって、 8000min^{-1} で $5\mu\text{m}$ と従来の潤滑法より主軸熱変位がかなり小さい。
- (3) アンダレースオイルエア潤滑ではジェット潤滑より消費動力が小さく、従来のオイルエア潤滑より高速回転が可能である。また軸受を鋼球からセラミック球に置き換えると、より高速回転が可能となる。
- (4) 熱流解析と予圧の増加の計算から、アンダレースジェット潤滑では潤滑油の軸側の冷却効果によって予圧の増加を抑えることができることが分かった。それはセラミック球を用いた効果より大きく、その結果として軸受の発熱を抑制し、超高速化が可能である。

参 考 文 献

- 1) M.Weck and A.Koch: Spindle-Bearing Systems for High-Speed Applications in Machine Tools, Ann.CIRP, 42, 1 (1993) 445.
- 2) 田島清和, 中村晋哉: 予圧切換主軸の開発, 昭和63年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1988) 599.
- 3) 稲崎一郎, 青山藤詞郎: 工作機械主軸および案内システムの高機能化に関する研究, 日本機械学会研究協力部会 RC91 研究成果報告書, (1991) 167.
- 4) 中村晋哉, 垣野義昭: 高速スピンドルにおける回転中の軸受予圧変化と主軸変位の解析, 精密工学会誌, 58, 12 (1992) 2019.
- 5) 中村晋哉, 垣野義昭, 村松 明, 浦野好市: モータビルトインスピンドルにおけるモータ発熱の影響と軸芯冷却の効果の解析, 60, 7 (1994) 979.
- 6) 千輝淳二, 垣野義昭: 工作機械の温度制御に関する研究 (第5報) - 主軸頭内の熱流分布, 精密工学会誌, 55, 8 (1989) 1937.
- 7) 田島清和, 中村晋哉: 工作機械主軸へのジェット潤滑の応用, 昭和63年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1988) 789.