電わい素子ノズルを用いた工作機械用
高速主軸のオイルエア潤滑*筒井 敏^{*1}, 青山 藤詞郎^{*2}
稲崎 一郎^{*2}, 清水 哲^{*3}Development of an Oil-Air Lubrication System with
Piezoelectric Nozzle for Machine Tool SpindlesSatoshi TSUTSUI, Tojiro AOYAMA,
Ichiro INASAKI, and Tetsu SHIMIZU

Oil-air lubrication is one of the effective lubrication methods for the high-speed spindle of machine tools. However, the oil supply rate to the bearing fluctuates remarkably due to the intermittent oil supply from the oil-air mixing valves. In this study, a new oil-air mixing equipment is developed by applying the piezoelectric nozzle which has been used for the printing head of ink-jet printers. By using the piezoelectric nozzle instead of the conventional mixing valve, the fluctuation of the oil supply is successfully suppressed. And it becomes possible to attach the oil-air mixing equipment close to the bearing. The oil supply rate can be, therefore, quickly changed in response to the change of running condition of the bearing.

Key Words: Machine Tool, Oil-Air Lubrication, Oil Supply Rate, Oil-Air Mixing Equipment, Piezoelectric Nozzle

1. 緒 言

工作機械主軸の高速化を図る際に問題となる因子の一つに潤滑法の選択が挙げられる。現在、行われている潤滑法には、グリース潤滑、オイルミスト潤滑、オイルエア潤滑、ジェット潤滑などがある。微量給油潤滑法の一つであるオイルエア潤滑法は、装置が比較的簡単であること、潤滑油ミストによる雰囲気汚染の心配がないなどの特長により、高速主軸用の潤滑法として近年多く採用され、これまでにオイルエア潤滑の特性について、温度上昇に関する報告⁽¹⁾⁽²⁾、供給系ユニットの最適条件や軸受の油膜形成状態に関する報告⁽³⁾がされている。オイルエア潤滑は、毎min数十Lの大量の空気流中に、数minに1回の割合で間欠的に微量の潤滑油を吐出し、空気流とともに軸受内部に給油する方式である。間欠的な給油による給油量の変動を抑制するために、潤滑油混合部から軸受近傍に設けられたオイルエア噴射ノズルの間を内径2~4mm

程度のナイロンチューブで連絡し、その内壁を潤滑油が高速の空気流によって軸受まで運ばれていく間に給油量がある程度平均化される仕組みになっている。

軸受に供給される潤滑油量に変動が生ずると、これにともない軸受温度が変動し、安定した特性が得られない。潤滑油の供給油量の変動を抑制するには、潤滑油の1回の吐出量を少なくし吐出時間間隔を短くすること、ナイロンチューブの長さを一定の長さ以上にとることが提案されている⁽⁴⁾。しかし、現在実用に供されているオイルエア潤滑装置では、潤滑油の吐出混合部に機械式の定量ピストン式分配器を使用しているため、1回の吐出油量はこれに組み込まれる定量ニップルの寸法によって制限される。また、ナイロンチューブの長さは、設置スペースの問題や給油に時間遅れが生ずるなどの点からあまり長くできない。

そこで、本研究ではインクジェットプリンタなどに使用されている圧力パルス方式の電わい素子ノズルに注目し、これをオイルエア潤滑装置の潤滑油吐出混合部分に適用することを試みた。

2. 電わい素子ノズルによる潤滑油供給機構

本研究で使用した電わい素子ノズルの構造を図1に示す。ノズルは、ガラス管の外周面に円筒状の電わい

* 昭和63年3月31日 第65期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和62年9月30日。

^{*1} 学生員、慶應義塾大学大学院 (〒223 横浜市港北区日吉3-14-1)。

^{*2} 正員、慶應義塾大学理工学部。

^{*3} 正員、牧野フライス精機(株) (〒243 神奈川県愛甲郡愛川町中津4029 神奈川内陸工業団地)。

素子が接着された構造になっている。電わい素子に電圧を印加するとガラス管内の体積変化が起こり、ノズル先端まで満たされた潤滑油が油滴として吐出される。このとき、単位時間当たりの吐出油量は、電わい素子に印加するく形波状の電圧の周波数によって調節される。ノズルより吐出される油滴の径は、油の粘度、ノズルの内径、印加電圧の振幅と周波数などの影響を受けるものと考えられる。

使用する潤滑油の粘度を、通常オイルエア潤滑に使用される油の範囲内で $22 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ (40°C) とし、また印加電圧はインクジェットプリンタなどに使用する場合と同じ $0 \sim 400 \text{ V}$ に設定することにして、周波数と油滴径の関係を2種類のノズル内径について測定した結果を図2に示す。油滴径の測定にあたっては、一定の周波数のもとで一定時間油滴を容器にとどめ、その重量を測定して1滴の平均油滴径を算出する方法を採用した。図2より、印加電圧の周波数が高いほど吐出される油滴径が小さくなることわかる。ノズル内径については、これが大きいほど油滴径も大きくなる。潤滑油粘度は、これが高いほど吐出が困難になる傾向が認められるが、オイルエア潤滑に多く使用される $10 \sim 30 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ (40°C) の範囲では、正常な油滴の吐出が行われることが確認された。

このように、電わい素子ノズルを用いることにより、直径が $100 \sim 140 \mu\text{m}$ 程度の油滴を連続的に吐出することが可能で、油滴の体積は従来の機械式の吐出機構による最小油滴径の 1.34 mm よりもかなり小さい。したがって、機械式の定量ピストン式分配器を電わい素子ノズルに置き換えることにより、吐出時間間隔を飛躍的に短縮して給油むらを抑制することが期待される。なお、油滴径は、オイルミスト潤滑の場合のミスト径である $1 \sim 2 \mu\text{m}$ にくらべてはるかに大きいので、吐出された油滴がミスト状になって飛散する恐れはない。電わい素子ノズルより吐出される油滴を高速の空気流に混合し、途中で油だまりを生ずることなく円滑に軸受に供給するために、図3に示すような潤滑油混合機構を試作した。電わい素子ノズルは、アクリル樹脂製の給気継手内部の軸線上に固定されている。給気を行うと、給気継手内部の圧力が潤滑油タンク内の圧力よりも高くなるため、ノズル先端より空気がタンク内に逆流してしまう。そこで、これを防止するために給気継手と潤滑油タンクを内径 2 mm の管で結び、タンク内に背圧をかけた。また混合部の先端にオイルエア噴射ノズルが直結されている。

次に、従来形の混合機構と電わい素子ノズルを使用した混合機構の給油むらを比較した。給油むらは、オ

イルエア噴射ノズルの先端より 5 mm の位置に、毎 $\text{min } 5 \text{ mm}$ の速度で吸湿性の良い紙を送り、その紙についた油のしみ幅の変動を測定することによって評価した。従来形の混合機構については、可能な限り給油むらが少なくなる条件として、1回当たりの吐出量が最小の条件 (0.01 cm^3) を採用し、また潤滑油混合部とオイルエア噴射ノズル間を長さ 4 m のナイロンチューブで接続した。一方、電わい素子ノズルを使用した混合機構においては内径 $106 \mu\text{m}$ のものを使用した。

図4に、両者の給油量と油のしみ幅の変動との関係を示す。縦軸の ΔW はしみ幅の最大値と最小値の差で、 W_m はしみ幅の平均値である。すなわち $\Delta W/W_m$ の値が大きいほど、給油むらの割合が大きいことを意

図1 電わい素子ノズルの構造

図2 周波数と油滴径の関係

図3 潤滑油混合機構

味する。これより、従来形では単位時間当たりの給油量が少なくなると、つまり吐出時間間隔が長くなると、給油むらが大きくなることが明らかである。これに対して電わい素子ノズルを用いると、単位時間当たりの給油量を少なくしても、これによる給油むらの増大はほとんど認められない。また、全体として従来形よりも給油むらが少ないことがわかる。これは、電わい素子ノズルによる潤滑油吐出間隔が従来形の場合よりもはるかに短いため、例えば、 $0.5 \text{ cm}^3/\text{h}$ で潤滑油を供給するには、従来形が 72 s に 1 回の割合であるのに対して、電わい素子ノズルを使用すると約 0.008 s に 1 回 (120 Hz) の割合で頻りに油滴を吐出することになる。

3. 主軸系への適用

電わい素子ノズルを利用したオイルエア潤滑装置を軸受試験装置に取付け、その性能を調べた。

実験に使用した軸受試験装置の概略を図 5 に示す。試験軸受にはアンギュラコンタクト玉軸受 7011C (内径 55 mm, 外径 90 mm) を用いた。潤滑油は、高速スピンドル油 (ISO VG22) を使用した。試験軸受の外輪押えは、ハウジングとは非接触構造になっており、これを後方から大形ねじに取付けたロードセルを介して押すことにより、軸受にかかる予荷重を調整し測定することが可能になっている。また、軸受外輪には温度測定用として C-C 形熱電対が取付けてある。さらに、軸受の転動体と内外輪の間で生ずる摩擦の状態を検出する目的で、外輪押えに AE センサが取付けてある。

軸受内部で潤滑油不足状態になると、転動体と軸受内外輪間の金属接触の割合が増加し、AE 信号の振幅

レベルが上昇すると考えられる。

図 6 に電わい素子ノズルを用いた場合の給油量と軸受温度上昇の関係を示す。図 6 には、従来形の混合機構を使用した場合の結果も合わせて示してある。これより、わずかに電わい素子形のほうが温度上昇が低くなる傾向が認められるが、全体としてはほぼ同様な特性が得られることがわかる。

図 7 に従来形のオイルエア供給機構を用いたときの、軸受外輪温度、AE 振幅レベル、予荷重の三つの値の時間的变化を示し、図 8 に電わい素子ノズルを用いた場合の同様な測定値の変化を示す。図の横軸は時間を表している。従来形の場合、 $t=0$ で吐出間隔をそれまでの 16 min 間隔から 1 min 間隔に短縮し、単位時間当たりの給油量を 16 倍に増やしている。電わい素子ノズルを使用した場合は、この変化に対応して潤滑油吐出周波数を 9 Hz から 130 Hz へと増加させている。これ以外の条件は、どちらの場合も同じである。

電わい素子ノズルを用いたオイルエア潤滑装置の場合、従来形のように供給油量の平均化を目的とした長い配管を設けなくてよいので、油量を変更するとその効果がすぐに軸受動作状態に現れる。すなわち、軸受到達する油量が増加することにより、潤滑油のかく

図 5 軸受試験装置

図 4 給油量と給油むらの関係

図 6 給油量と軸受温度上昇の関係

はんあるいはせん断による発熱に起因して軸受温度が上昇し、転動体と内外輪間の油膜が十分に形成されることでこの部分の金属接触が減少して AE 信号の振幅レベルが低下する。これに対して約 4 m の配管を有する従来形の場合は、図 7 に示したように潤滑油の供給間隔を変更しても、その効果が現れるまでには約 20 min の時間遅れが生ずる。

4. AE 振幅レベルの監視による 潤滑油供給量の自動調整

オイルエア潤滑装置の潤滑油混合部分に電わい素子ノズルを適用することにより、軸受に供給する潤滑油量を従来形の場合よりも細かに、また敏速に調整することが可能であることがわかった。そこで、AE 振幅レベルにより軸受の潤滑状態を監視して潤滑油供給量の自動調節を行うことを試みた。

図5に示した軸受試験装置に図9に示すような給油量自動調節システムを試作し取付けた。システムは、AE信号による軸受潤滑状態監視系とく形波発信器と電わい素子駆動電源による給油量調節系および16ビ

図 7 従来形を用いた場合の測定値の時間的变化

図 8 電わい素子ノズルを用いた場合の測定値の時間的変化

ットマイクロコンピュータによって構成されている。まず、試験軸受の外輪押えに取付けた AE センサにより検出された信号を、100 kHz~1 MHz のバンドパスフィルタを通し、全波整流と平滑化を行った後の AE 振幅レベルを A-D 変換器によりマイクロコンピュータに入力する。入力された AE 振幅レベルがあらかじめ設定された AE 振幅レベルよりも高い場合には、軸受内の潤滑油量が不足していると判断し、D-A 変換器の出力を変化させて発信器の周波数を増加させ、電わい素子ノズルの潤滑油吐出周波数を上げ、単位時間当たりの潤滑油供給量を増加させる。これとは逆に監視中の AE 振幅レベルが設定 AE 振幅レベルよりも低い場合には、給油量を減少させるように動作する。

図 10 では、主軸回転数を一定とし、時刻 $t=0$ で予荷重を約 400 N から 800 N に増加させた場合の結果を示す。予荷重を増加させる前は 130 Hz で試験を行い、測定値が定常に達した時点での AE 振幅レベルを設定値とした。その後、予荷重を増加させることにより潤滑油膜が薄くなり AE 振幅レベルが設定値より高くなっている。これに従い、潤滑油吐出周波数が高くなり軸受への給油量が増大して、AE 振幅レベルは再び低下する。また、周波数の調節の割合については、これがあまりにも大きすぎると油量の調節が振動的になり不安定であり、また小さすぎると応答速度が遅くなる。制御理論的には、最適な値が存在するものと考えられるが、ここでは、測定値と設定値との差によって周波数の増減値を変える方式を採用している。

このように、電わい素子ノズルをオイルエア潤滑装置の潤滑油混合部に用い、また、軸受内部状態を示すパラメータの一つであると考えられる AF 振幅レベル

図 9 給油量自動調整システムの構成

図 10 給油量自動調整の効果

を監視しつつ、軸受供給油量を自動調整することの可能性が確認された。実用的には、本実験で行ったような細かな給油量の調整は必ずしも必要でないかもしれないが、軸受焼付きなどの異常の発生の前兆を AE 信号によって監視し、即座に給油量を増やし、軸受損傷を防止する手段として有効なものと考えられる。

5. 結 論

現在使用されている、オイルエア潤滑装置の給油特性を向上させるために、電わい素子ノズルを利用したオイルエア混合機構を試作し、その効果を調べた。そ

の結果、以下の点が明らかとなった。

(1) これまでの定量ピストン式分配器を、電わい素子ノズルに代えることにより、1回の潤滑油の吐出量を少なくし、吐出時間間隔を極めて短くすることが可能で、これにより給油むらをかなり抑制することができる。

(2) 電わい素子ノズルを使用することにより、混合部から軸受のオイルエア噴射ノズルまでの配管が必要でなくなり、軸受のすぐ近くで空気流に潤滑油を混合することが可能となった。

(3) 軸受温度上昇については、従来形も電わい素子ノズル形もほぼ等しい特性が得られた。

(4) 軸受への供給油量を敏速に調節できることを利用し、軸受異常状態を検出して給油量を増減することが可能と考えられる。

最後に、本研究の遂行に当たりご協力をいただいた日立製作所(株)松田泰昌氏に厚くお礼申し上げる。

文 献

- (1) 滝口, 潤滑, 31-5 (昭 61), 311.
- (2) 正田・小野瀬, 潤滑, 32-3 (昭 62), 175.
- (3) 宮原, ベアリングエンジニア, No.53 (昭 62), 36.
- (4) 広田, 不二越技報, 43-1 (昭 62), 27.
- (5) 中川・ほか 3 名, 機論, 53-485, C (昭 62), 144.