

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月30日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560111

研究課題名（和文） 能動動圧軸受を組み込んだ高速・高精度エアースピンドルの開発

研究課題名（英文） High-Speed Precision Air-Bearing Spindle with Active Aerodynamic Bearing

研究代表者

水本 洋（MIZUMOTO HIROSHI）

鳥取大学・大学院工学研究科・名誉教授

研究者番号：80108795

研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は、近年その必要性が増加している微細・精密機械加工に用いる小径回転工具を駆動する高速・高精度エアースピンドルを開発することである。このエアースピンドルの特徴は、高速回転時に生じるスピンドル振動をスピンドルに組み込まれた能動動圧軸受によって抑制している点である。この動圧軸受の能動制御の効果により、スピンドル回転数 $44,000\text{min}^{-1}$ (730Hz) までにおけるスピンドルの全振動振幅を $0.1\mu\text{m}$ 程度に抑制できた。

研究成果の概要（英文）：

For improving the performance of small-diameter cutting and grinding tools used for precision machining, a novel high-speed precision air-bearing tool spindle is proposed. The proposed tool spindle employs an active aerodynamic bearing for suppressing the spindle vibration occurring at high rotational speed. Owing to the active control, the amplitude of the spindle vibration can be suppressed to be $0.1\mu\text{m}$ at the maximum rotational speed of $44,000\text{min}^{-1}$ (730Hz).

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、生産工学・加工学

キーワード：機械要素、トライボロジー

1. 研究開始当初の背景

近年、複雑な形状の部品を少ない工具交換回数で仕上げる、あるいは微細な部品に高精度の3次元構造を削り込むことなど目的として、小径回転工具を用いた精密・超精密加工への需要が増加している。加工例は、直径数 mm 以下の砥石による小型非球面光学素子の金型加工や、小径ドリル、エンドミルによ

る微細穴加工、微少部品加工などで見られる。このような加工において工具に適した切削速度を与えるには分速数万回転の高速スピンドルが必要となるが、スピンドルの振動振幅は一般に数 μm 程度に達する。そこで工具スピンドルでは加工点が限定されることを前提として、回転非同期成分 (NRRO) による評価がしばしば行われる。しかしながら、

曲面加工のように加工点に変化する場合や、今後需要が増すと考えられる直径数十 μm の小径工具を用いる場合では、たとえ NRRO が小さくとも回転同期成分 (RRO) が大きければ高精度な加工は望めず、工具寿命も短い。したがって、全振動振幅が $0.1\mu\text{m}$ 以下の工具スピンドルの開発、実用化が必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、超精密工作機械の工具スピンドルとして使用可能な高速・高精度エアースピンドルの開発である。開発の最終目標仕様は、回転数 $120,000\text{min}^{-1}$ (2kHz) おけるスピンドルのラジアル振動の NRRO、RRO 両成分を含めた全振幅を $0.1\mu\text{m}$ 以下とすることである。この目標を達成するために、静圧軸受に振動抑制のための能動動圧軸受を組み合わせたハイブリッド・エアースピンドルを設計、製作し、その回転精度を解析する。

3. 研究の方法

(1) エアースピンドルの基本構想

開発するハイブリッド・エアースピンドルでは、スピンドルにかかる負荷を基本的には静圧軸受で支持し、高速回転時に生じるスピンドル振動を能動動圧軸受によって抑制することと動圧軸受に過大な負荷容量を持たせない設計方針を採用した。この方針により能動動圧軸受の軸受面を高い回転精度が期待できる真円形とし、軸受面の一部を圧電素子により弾性変形させることで発生する動圧により負荷容量を得ることとした。このような可撓面軸受はコンパクトであり、スピンドル内への組み込みが容易である。しかも、動圧効果は回転数とともに増加することより、能動動圧軸受の採用により高回転速度領域での効果的な振動抑制が期待できる。

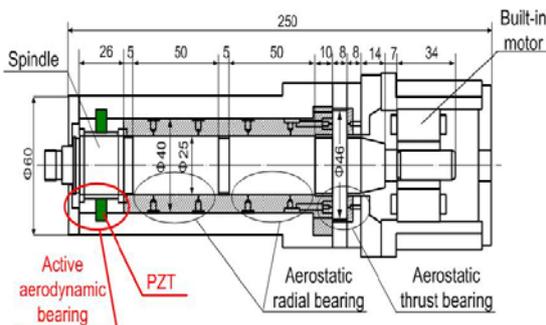


図1 能動動圧軸受を組み込んだエアースピンドル

このような構想、方針によって設計・試作されたハイブリッド・エアースピンドルを図1に示す。スピンドルは空気静圧ラジアル・スラスト軸受 (図1のハッチング部分でグラフィイト製) で支えられ、後端部に組み込まれたモータにより駆動される、スピンドル材

質は最初、アンバー (密度 8.15g/cm^3) としたが、共振振動数が目標回転数に比べて低いため、その後、窒化珪素系セラミックスのサイアロン (密度 3.24g/cm^3) に交換した。サイアロンはアンバーの半分以下の密度であるが、ヤング率は2倍以上である。駆動モータについても最初は誘導モータを用いたが、駆動周波数と実際の回転数の差違によるうなりが発生した。そこで、このようなうんりの生じない同期モータに交換した。

(2) 能動動圧軸受と制御システム

図1のスピンドル先端部 (左端) には銅合金製の能動動圧ラジアル軸受が組み込まれている。軸受面は真円であるが、軸受面背面の円周4カ所が NC ワイヤークットによりくりぬかれ、弾性ヒンジ構造となっている。

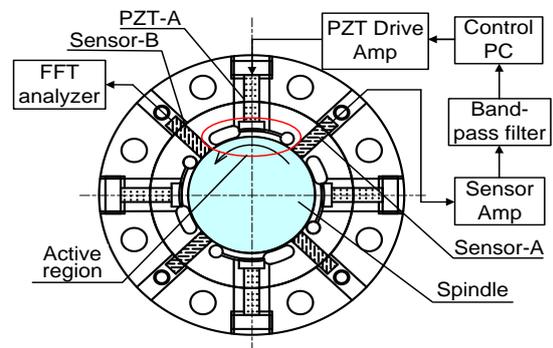


図2 能動動圧軸受の制御システム

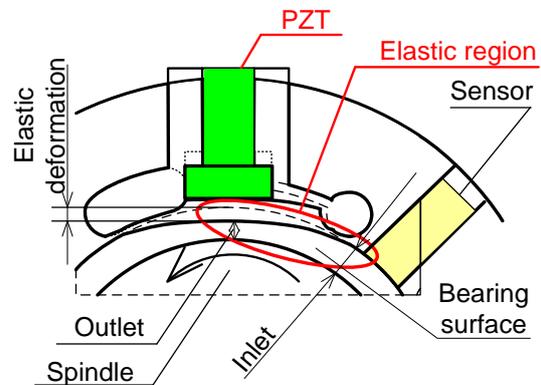


図3 軸受面の拡大図とその変形

この能動動圧軸受の制御システムを図2に示す。図2に見られるように能動動圧軸受の軸受面は真円であるが、軸受面の円周4カ所は弾性ヒンジ構造となっており、その背後に圧電素子を組み込んで軸受面をわずかに変形させることで、図3の拡大図に示すようにくさび領域を形成して動圧を発生させる。スピンドルの振動は直近に組み込まれた容量型変位センサにより検出され、デジタル化されたのち制御パソコンに送られる。この軸変位に応じてパソコンは圧電素子を駆動

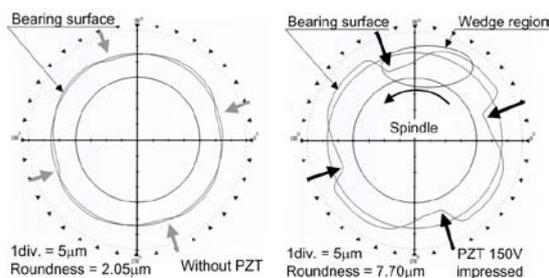


図4 能動動圧軸受の軸受面変形
(左:変形前、右:圧電素子による変形後)

して軸受面を変形させることで動圧軸受の負荷容量が調節できる。その結果、スピンドル位置を制御でき、振動を抑制できる。

図4には動圧軸受の軸受面の真円度を示す。左には加工後の軸受面の真円度を示すが、弾性領域での若干の加工時のスプリングバックを含めても真円度 $2\mu\text{m}$ 程度であり、軸受面の弾性変形領域を除けば真円度 $1\mu\text{m}$ 以内に仕上げられていることがわかる。この軸受面の矢印箇所を圧電素子により押し込むと図4右に示すように軸受面4カ所にくさび領域の形成されていることが確認できる。ただし、圧電素子の最大印加電圧(150V)における無負荷時の変形量が $8\mu\text{m}$ であるにもかかわらず、図4では軸受面の変形量はおおよそ $5\mu\text{m}$ と示されている。これは、軸受面の弾性変形抵抗により圧電素子への負荷が生じてその変形量が減少するためである。

以上のようにして準備されたハイブリッド・エアスピンドルとその制御システムを用いてスピンドル振動を観測し、能動制御による振動抑制効果を解析した。

4. 研究成果

(1) スピンドルの基本性能

図5にはサイアロン軸を用いたスピンドルの回転数 $60,000\text{min}^{-1}(1000\text{Hz})$ でのスピンドル振動を図2の動圧軸受部に設置された容量形変位センサにより観測したリサージュ



図5 回転数 $60,000\text{min}^{-1}(1000\text{Hz})$ でのスピンドル振動

波形を示す。振動振幅(回転同期成分、RRO)は $1\mu\text{m}$ 程度であるが、回転非同期成分(NRRO)は $0.2\mu\text{m}$ であると評価される。これが本スピンドルの能動制御を行わないときの回転精度である。

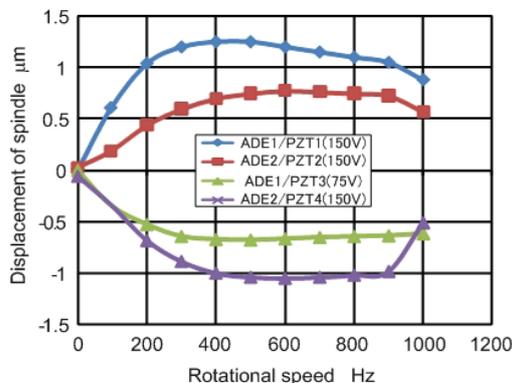


図6 能動動圧軸受のストローク

つぎに能動動圧軸受に組み込まれた各圧電素子への印加電圧を150Vとしたときのスピンドル変位、つまり能動制御のストロークを解析した結果を図6に示す。回転速度の上昇とともにストロークは増加しており、1 μm 前後に達している。しかしながら、回転速度が $24,000\text{min}^{-1}(400\text{Hz})$ 以上になるとストロークの飽和する現象が見られる。

(2) 能動制御開始による振動抑制効果

図7には能動動圧軸受を図2に示すシステムによりフィードバック制御を開始したときの水平・垂直方向のスピンドル振動と圧電素子への印加電圧の変化を示す。スピンドルの回転数は $30,000\text{min}^{-1}(500\text{Hz})$ である。能動動圧軸受を駆動させないときのスピンドル振動の振幅は両方向とも $0.3\mu\text{m}$ 程度であるが、制御開始とともに振動振幅は $0.1\mu\text{m}$ 程度に減少している。変位センサと圧電素子是对向して配置されており、たとえば軸受すきまの増加が検知されると制御パソコンは圧電

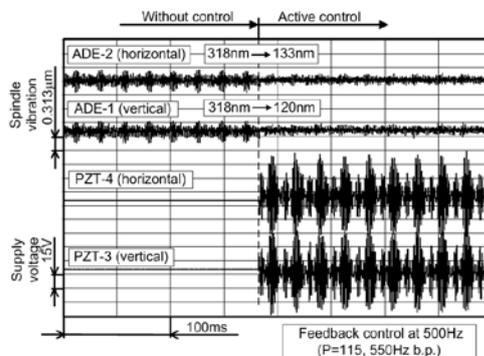


図7 能動制御開始によるスピンドル振動と圧電素子への印加電圧の変化

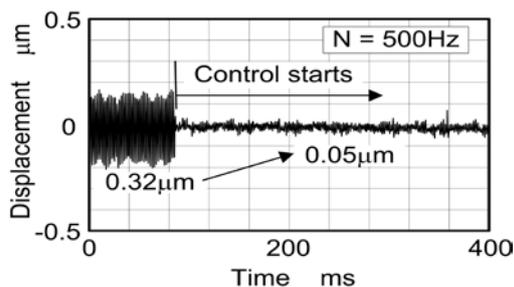


図8 能動制御開始による振動振幅の変化 (フィルタ調整後)

素子への印加電圧を上昇させてスピンドルを押し戻すように制御する。制御サイクルタイムは約 $30\mu\text{s}$ であることより、スピンドル変位に対する制御電圧の位相遅れはおよそ $1/60$ 回転であり、図7の下に示されたように圧電素子への印加電圧の変動波形は制御前のスピンドルの振動波形に良く対応している。このような能動制御軸受の動作によりスピンドル振動が抑制される。

制御システムにおける位相遅れは振動抑制効果に影響する。そこで図2の制御システムの変位センサからのフィードバック回路側に挿入されたバンドパスフィルタにより入力信号の位相を調節した。その結果、フィルタの通過周波数をスピンドル回転速度よりもわずかに高く設定した場合、図8に示すような良好な結果が得られた。このとき、制御開始とともに振動振幅は 50nm 程度にまで減少していることがわかり、高い回転精度の得られることが分かった。

(3) 能動制御による振動スペクトル変化

能動制御軸受の制御効果を検証するために、図9～11には回転数 $30,000\text{min}^{-1}$ (500Hz)～ $48,000\text{min}^{-1}$ (800Hz)での制御前後のスピンドル振動波形とその周波数特性の変化を示す。図9の回転数 $30,000\text{min}^{-1}$ (500Hz)においては制御開始とともに振動振幅が大きく減少しているが、それに対応して周波数特性では回転数同期成分が 20dB 程度減少している。しかしながら、同期成分以

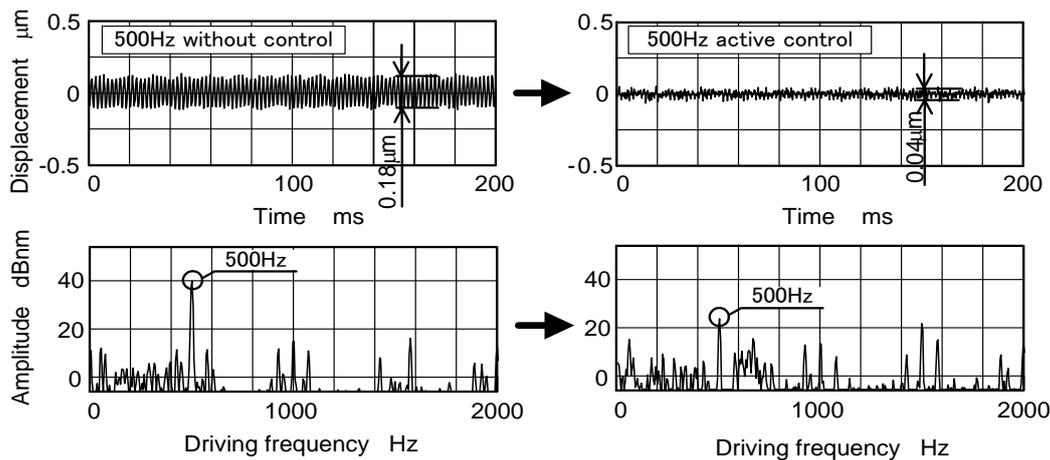


図9 能動制御による振動抑制効果 (N=500Hz)

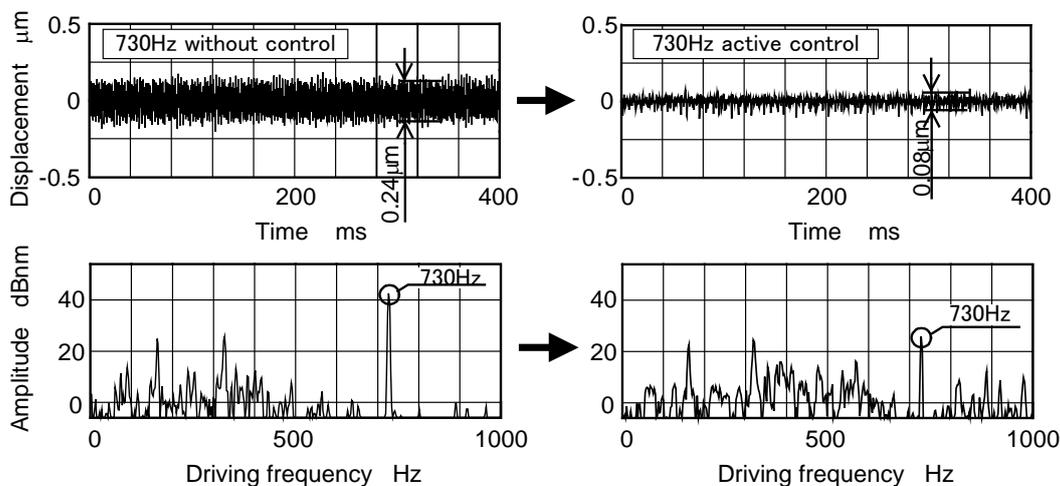


図10 能動制御による振動抑制効果 (N=730Hz)

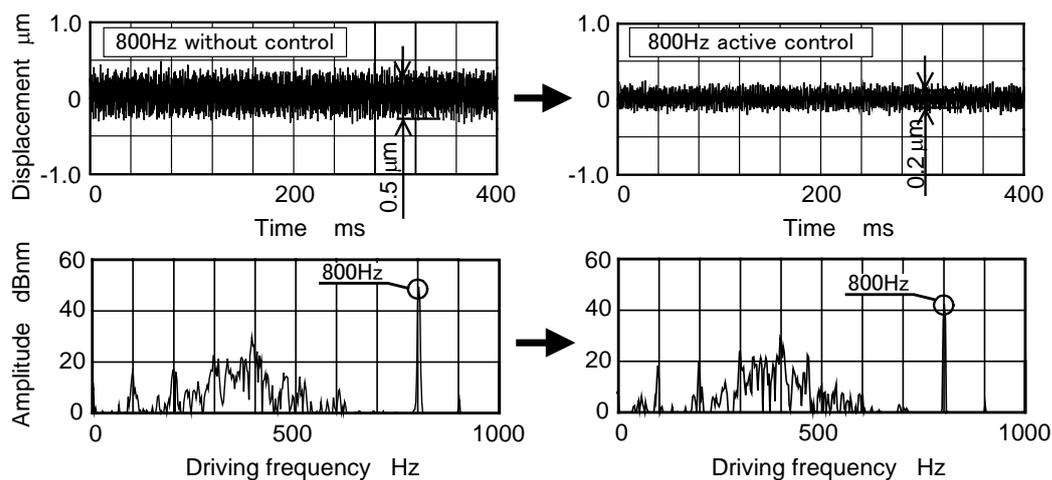


図 1 1 能動制御による振動抑制効果 (N=800Hz)

外の振動成分には制御によっても大きな変化は見られない。これは制御システムに位相調整のためのバンドパスフィルタを組み込んだことの影響と考えられる。その結果、振動波形には細かい乱れが見られ、より高い回転精度を実現する障害となっている。

図 1 0 の回転数 $44,000\text{min}^{-1}$ (730Hz) においても制御開始とともに振動振幅が大きく減少しており、周波数特性でも回転数同期成分が 20dB 程度減少している。しかしながら、回転周波数から離れた周波数領域では制御により振動成分の増加が見られ、不規則な振動波形の原因となっている。さらに回転速度を $48,000\text{min}^{-1}$ (800Hz) に上げた図 1 1 では制御により振幅は減少しているが、回転数同期成分の減少は 10dB 程度にとどまっており、制御効果が低くなっている。

以上において観測された能動制御によるスピンドル振動抑制効果をまとめて図 1 2 に示す。回転数が $44,000\text{min}^{-1}$ (730Hz) 以下では非制御時の振動振幅はおおむね $0.2\mu\text{m}$ であるが、能動動圧軸受を駆動して振動を制御することで振動振幅を $0.1\mu\text{m}$ 程度に抑制できていることが分かる。

(4) 能動動圧軸受による精密位置決め

能動動圧軸受は軸位置を制御できるので、振動抑制だけでなく、スピンドル位置を制御することもできる。そこで図 2 の制御システムを用いて、回転数 $18,000\text{min}^{-1}$ (300Hz) の状態でスピンドルの位置決めを行った。制御目標を $1\text{nm}\sim 50\text{nm}$ のステップ量とし、同一方向に 5 回の位置決めの後、逆方向にも 5 回のステップ位置決めを行った。位置決め実験の結果を図 1 3 に示す。ただし、ローパスフィルタにより 100Hz 以上の成分はのぞかれている。したがって図 1 3 では振動は見られないが、実際には $0.1\mu\text{m}$ 程度の振幅で振動していると考えられる。したがって、図 1 3 の 結

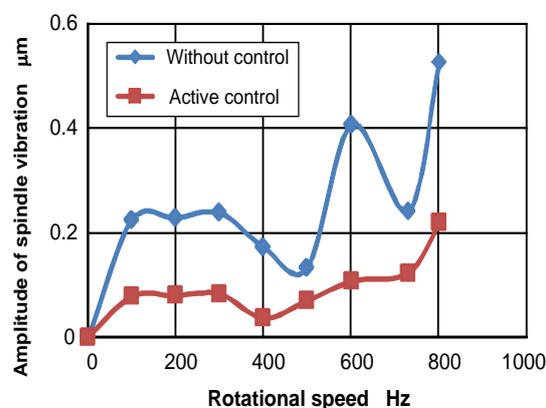


図 1 2 能動制御による振動抑制効果のまとめ

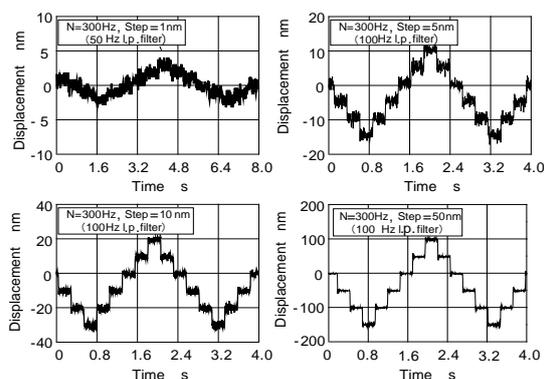


図 1 3 能動動圧軸受による精密位置決め

果はこのようなスピンドル振動の中心位置の変位と考えればよい。その上でこれらの図を見ると、 $2\sim 50\text{nm}$ のステップは明瞭であり、これらの分解能で位置決めが行えていることが分かる。しかしながら、 1nm のステップでは位置決めが行えていると思われるがノイズが大きく明瞭ではない。

(5) まとめ

高速エアースピンドルの軸振動を抑制して回転精度を向上させるために能動動圧軸受の使用を提案した。回転精度の維持を考慮して設計された能動動圧軸受を組み込んだハイブリッド・エアースピンドルの能動制御を行った結果、次のことが明らかとなった。

- ① 能動動圧軸受の駆動によりスピンドル位置を制御できることが示された。制御ストロークは回転速度とともに増加することが期待されたが、ある回転速度以上では増加しなかった。
- ② スピンドルの回転速度が 44,000min⁻¹ (730Hz) までの速度範囲では動圧軸受の能動制御により軸振動は回転同期成分、回転非同期成分ともに効果的に抑制できており、振動振幅はほぼ 0.1 μ m程度に減少させられた。
- ③ 能動動圧軸受により軸位置を制御できることよりナノメートルオーダーの分解能で位置決めすることが可能である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

- ① H. Mizumoto, Y. Yabuta, S. Arie, Y. Tazoe and T. Hirose, Effect of Active Aerodynamic Bearing on Performance of High-Speed Precision Air-Bearing Spindle, Proceedings of 10th International Conference on Progress of Machining Technology, Vol.1, 2012, pp.161-164, 査読有
- ② H. Mizumoto, Y. Yabuta, S. Arie, Y. Tazoe and T. Hirose, Performance of High-Speed Precision Air-Bearing Spindle with Active Aerodynamic Bearing, Proceedings of 12th International Conference of the European Society for Precision Engineering & Nanotechnology, Vol.1, 2012, pp.356-359, 査読有
- ③ H. Mizumoto, Y. Yabuta, S. Arie, Y. Tazoe and T. Hirose, Active Aerodynamic Bearing for High-Speed Air-Bearing Spindle, Proceedings of Asian Symposium for Precision Engineering and Nanotechnology, Vol.1, 2011, pp.300-303, 査読有
- ④ H. Mizumoto, Y. Yabuta, S. Arie, Y. Tazoe, K. Atoji and T. Hirose, Active Control of High-Speed Precision Air-Bearing Spindle, Proceedings of 11th International Conference of the European Society for precision

Engineering & Nanotechnology, Vol.1, 2011, pp.355-358, 査読有

- ⑤ H. Mizumoto, Y. Yabuta, S. Arie, Y. Tazoe, and S. Yokouchi, An Active Aerodynamic Bearing for Ultraprecision Machining, Proceedings of 12th International Conference of the European Society for precision Engineering & Nanotechnology, Vol.1, 2010, pp.300-303, 査読有

[学会発表] (計2件)

- ① 水本 洋、藪田義人、有井士郎、広瀬智宏、田添洋一、高速エアースピンドルに組み込んだ能動動圧軸受による微小位置決め、2011年度精密工学会秋季大会学術講演会、2011年9月21日、金沢大学
- ② 水本 洋、藪田義人、有井士郎、広瀬智宏、田添洋一、能動動圧軸受を組み込んだ高速・高精度エアースピンドルの開発、2011年度精密工学会春季大会学術講演会、2011年3月15日、東洋大学

6. 研究組織

(1)研究代表者

水本 洋 (MIZUMOTO HIROSHI)

鳥取大学・大学院工学研究科・名誉教授

研究者番号：80108795