

# センサレス磁気軸受のターボ分子ポンプへの応用

An Industrial Application of Sensorless Active Magnetic Bearings

水 野 毅\*・ハネス プロイレル\*\*・田 中 博 昭\*\*\*  
橋 本 秀 紀\*\*\*・原 島 文 雄\*\*\*・上 山 拓 知\*\*\*\*  
Takeshi MIZUNO, Hannes BLEULER, Hiroaki TANAKA  
Hideki HASHIMOTO, Fumio HARASHIMA and Hirochika UEYAMA

## 1. は じ め に

現在、磁気軸受はターボ分子ポンプやスピンドルなどにおいて実用化されている。しかし、磁気軸受は、ギャップを検出するためのセンサや電磁石、制御回路などを必要とするので、従来の機械式軸受を用いたものに比べてコストがかかり、装置全体が大きくなる。ギャップセンサを用いないセンサレス磁気軸受は、これら問題を解決する有力な方法として考えられる。また、センサのターゲットを必要としない分だけ、ロータを短くし危険速度を上げることができる。センサレス磁気軸受は実験機段階ではすでに成功している<sup>1),2)</sup>。しかし、実用機を用いての実験はまだ行われておらず、センサレス磁気軸受がどの程度実用性があるかは研究されていない。

そこで本研究では、実用機（ターボ分子ポンプ）を用いてセンサレス磁気軸受を実現し、実用に耐え得る制御系を構成することを目標とする。磁気軸受を実用化にするにあたって、軸受剛性はもっとも重要な特性の一つである。特に、センサレス磁気軸受の場合には、静的には「負の剛性」という従来の磁気軸受にはない特徴を持っているので、これはセンサレス磁気軸受の実用化に際して、考慮すべき重要な特徴となると考えられる。そこで本稿では、センサレス磁気軸受をターボ分子ポンプに適用し、安定に浮上させた後、負の剛性を実際に調べるためにステップ外乱に対する応答を測定する、また周期外乱に対する応答を調べるため、センサレスの状態でもロータを回転させ、つり合い

応答を測定する。さらに、このつり合い力に対して、補償器（Current Regulation）を構成し、その効果を調べる。

## 2. センサレス磁気浮上の原理

センサレス磁気軸受では、電磁石にかかる電圧を制御入力とし、電流のみを観測しオブザーバーによって推定された変位を用いて安定浮上させる。Fig. 1 に磁気浮上系の 1 自由度モデルを示す。

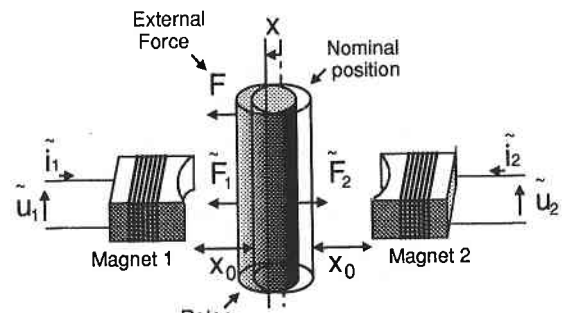


Fig. 1 1 DOF Model

Table. 1 : Notation

Mass	$m$
Inductance	$L$
Resistance	$R$
Voltage/velocity factor	$k_b$
Force/current factor	$k_i$
Force/displacement factor	$k_s$

\*埼玉大学 工学部 機械工学科

\*\*東京大学生産技術研究所 第2部

\*\*\*東京大学生産技術研究所 第3部

\*\*\*\*光洋精工(株)

システムの各パラメータを Table 1 のように表し、電磁石の磁力を  $F_1 = k_i i_1 + k_s x$  のように浮上点まわりで線形化すると、状態方程式は次のようになる<sup>1)</sup>。

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u, y = \mathbf{C}\mathbf{x} \\ \frac{d}{dt} i = -a_{33}i + bu + \end{cases} \quad (1)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ a_{21} & 0 & a_{23} \\ 0 & -a_{32} & -a_{33} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = [0 \ 0 \ b]^T, \mathbf{C} = [0 \ 0 \ 1]$$

$$\mathbf{x} = [x \ \dot{x} \ i]^T$$

ただし、

$$a_{21} = 2 \frac{k_s}{m}, a_{23} = \frac{k_i}{m}, a_{32} = 2 \frac{k_b}{L}, a_{33} = -\frac{R}{L}, b = \frac{1}{L}$$

$$i = \tilde{i}_1 - \tilde{i}_2, u = \tilde{u}_1 - \tilde{u}_2, i_+ = \tilde{i}_1 + \tilde{i}_2, u_+ = \tilde{u}_1 + \tilde{u}_2$$

である。システム (式 1) は 3 次と 1 次のサブシステムにわかれており、ロータの運動 (3 次のサブシステム) は入力電圧の差 ( $u = \tilde{u}_1 - \tilde{u}_2$ ) だけが影響を及ぼしていることがわかる (Fig. 2)。

また、このシステムが可制御・可観測であることは簡単に示せるので、オブザーバーを用いてシステムの極を任意に配置することができる。本研究では、この 3 次のサブシステムをもとに同一次元オブザーバーを構成し、センサレス磁気浮上を実現した (Fig.3)<sup>1)</sup>。

### 3. センサレス磁気軸受の剛性

ロータにステップ状の外乱 ( $d_0$ ) が加った場合を考える

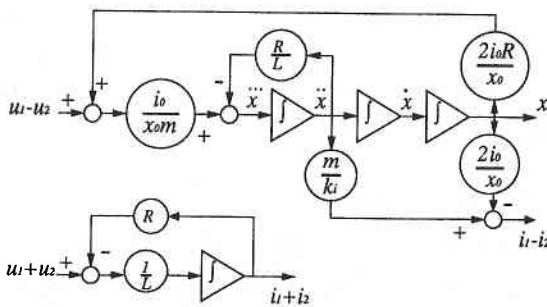


Fig. 2 Block diagram of AMB system

<sup>1)</sup> 1 次のサブシステムはバイアス電流 (電流の動作点) を制御するのに用いる

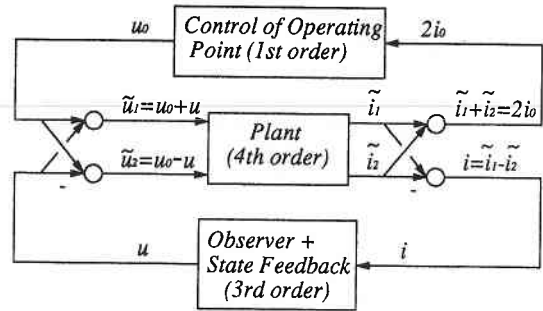


Fig. 3 Control of AMB system

と、システムの状態方程式は以下のように表せる。

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x}_a = \mathbf{A}_a \mathbf{x}_a + \mathbf{B}_a u, y = \mathbf{C}_a \mathbf{x}_a \quad (2)$$

$$\mathbf{A}_a = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \begin{bmatrix} 0 \\ d_0/m \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ 0 \ 0 \ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_a = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{C}_a = [\mathbf{C} \ 0]$$

$$\mathbf{x}_a = [\mathbf{x} \ 1]^T$$

すると、このシステムは不可観測となり、外乱が加った場合でも制御電流  $i$  は零に収束してしまう。その結果、変位は

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x = -\frac{d_0}{ma_{21}} \quad (3)$$

となり、外乱の加った方向とは逆方向の変位が生じ、あたかも、負の剛性を持っているかのように運動する<sup>2)</sup>。一方不つり合い力などの周期外乱  $p(t) = p_0 \cos \omega_0 t (\omega_0 \neq 0)$  がロータに作用した場合は、システムの状態方程式は、

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x}_e = \mathbf{A}_e \mathbf{x}_e + \mathbf{B}_e u, y = \mathbf{C}_e \mathbf{x}_e \quad (4)$$

$$\mathbf{A}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \begin{bmatrix} 0 \ 0 \\ 1/m \ 0 \\ 0 \ 0 \end{bmatrix} \\ 0 \ 0 \ 0 & \begin{bmatrix} 0 & -\omega_0 \\ \omega_0 & 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

研究速報

$$B_e = \begin{bmatrix} B \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad C_e = [C \ 0 \ 0]$$

$$x_e = [x \ [w_1 \ w_2]]^T, \quad \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_0 \cos \omega_0 t \\ p_0 \sin \omega_0 t \end{bmatrix}$$

となり、 $(C_e, A_e)$  が可観測になることが容易に示される。したがって、変位  $x$  および外乱  $p(t)$  を推定することができ、不つり合い補償が可能となる。

4. 実験システム

Fig. 4 に本研究の実験システムを示す。磁気軸受の対象としては、光洋精工社製ターボ分子ポンプ用磁気軸受スピンドル (定格 42,000 [rpm], 総重量 24 [Kg]) を用いた。ターボ分子ポンプのロータ位置および、コイルの電流値は AD (16bit, 2ch × 16) を介してコントローラ (DSP TMS320C30) に取り込まれる。コントローラにより計算された制御電圧は、DA (12bit, 5ch) から PWM アンプ (90KHz) に入り増幅され磁気軸受を駆動する。

現在用いている磁気軸受 (ターボ分子ポンプ) はラジアル軸受が重心に対して非対象に配置されているので、厳密には運動間の干渉を考慮すべきであるが、今回の実験においてはそれぞれの軸受について Fig. 1 の 1 自由度モデルを用いた。

2. 実験結果

5.1 浮上実験

周波数応答により同定したパラメータをもとに、極配置によってオブザーバおよびフィードバックのゲインを決定した。設計したコントローラは、サンプリング周期 130 [μsec] で離散化を行った。

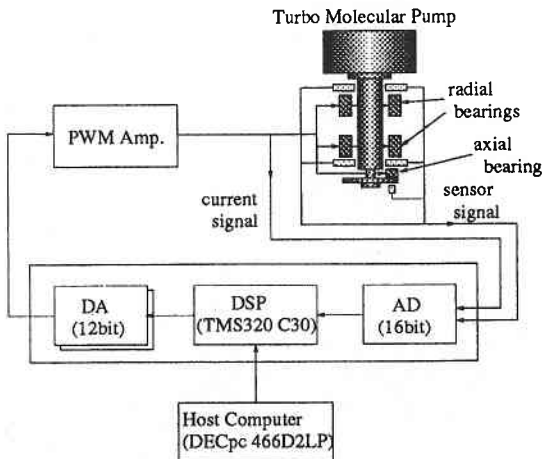


Fig. 4 Experiment System

実験は、まず基礎段階として上側のラジアル磁気軸受においてのみセンサレスで磁気浮上を行った。Fig. 5 にスタートアップ時の応答を示す。オブザーバの出力は0.03秒前後からセンサ出力とよく一致している。線形近似した領域から大幅に離れているタッチダウン時の状態からでも安定に浮上させることがわかる。

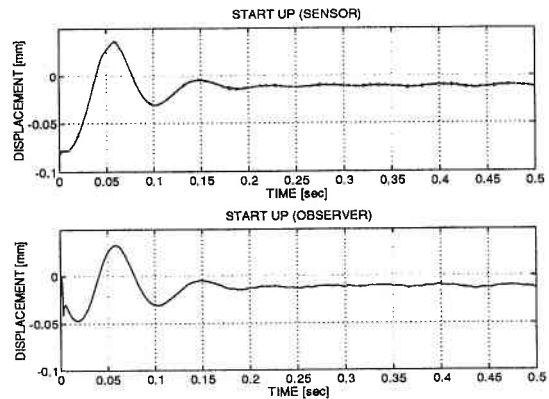


Fig. 5 Start-up transition

5.2 ステップ外乱に対する応答の測定

ここでは、センサレス磁気軸受の特徴である「負の剛性」を実際に調べるために、ステップ外乱に対する変位の応答および電流の挙動を測定し、センサを用いた場合と比較する。ステップ外乱応答はロータにかけた約0.6Kgの負荷を取り外すことによって測定した。Fig. 6 に負荷を取り除いた時の変位の応答とオブザーバの出力を示す。負荷の方向は、変位の正の方向にかけており、約0.4 [sec]において取り除かれている。また、Fig. 7 に電流の測定値をセンサを用いた場合とともに示す。

Fig. 6 からロータは外力の方向と逆方向に変位しており、「負の剛性」を持っていることがわかる。また、負荷を取り除く前後で、オブザーバの出力値はほとんど変化していないことがわかる。一方、電流値もセンサを用いた場合と違い、負荷のあるなしに関わらず一定値を保っていることがわかる。

5.3 不つり合い応答

センサレス磁気浮上の状態で、ロータを2700rpmで回転させ、不つり合い応答を測定した (Fig. 8 : 上段から、実際の位置信号・オブザーバ出力・電流信号)。また、不つり合い補償器 (Current Regulation) を構成し<sup>2)</sup>、その効果を調べた (Fig. 9)。

Fig. 8 から周期外乱に対しては、変位を良く推定してい

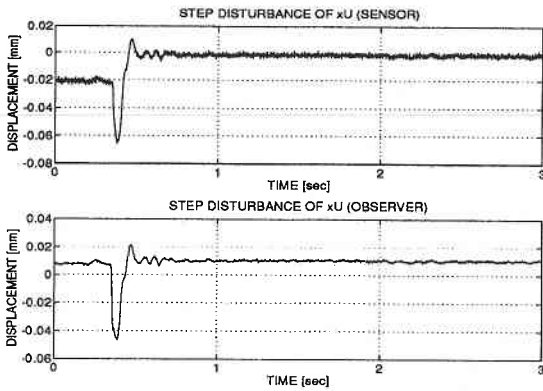


Fig. 6 Step disturbance response of displacement (upper: sensor output, lower: observer output)

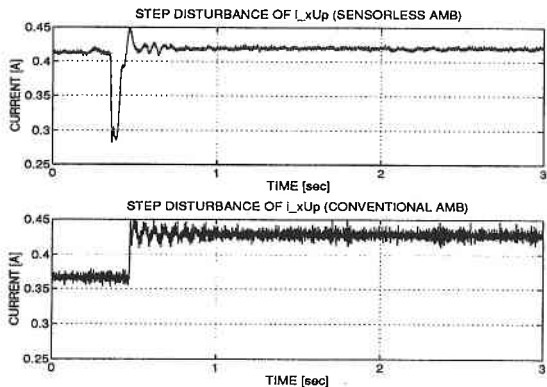


Fig. 7 Step disturbance response of current (upper: Sensorless AMB, lower: Conventional AMB)

ることがわかる。また、Fig. 9 をみると Current Regulation の補償器は電流振幅を大幅に抑えることができ、効果が現われていることがわかる。

### 6. おわりに

ターボ分子ポンプに対して、その制御電圧—変位の周波数応答からシステムのパラメータを同定し、その結果にもとづいてセンサレス磁気浮上を実現した。また、センサレス磁気軸受の特徴である負の剛性を実際に確認するために、ステップ状外乱に対する応答を測定した。さらに不釣り合い力（周期外乱）に対して、補償器を構成し、その効果を調べた。

センサレス磁気軸受は、ステップ状外乱に対しては、「負の剛性」の影響でギャップが逆応答するが、電流値は一定値に保つことができるので、バイアス値を永久磁石に置き換えることによって、理想的にはゼロパワー制御が可

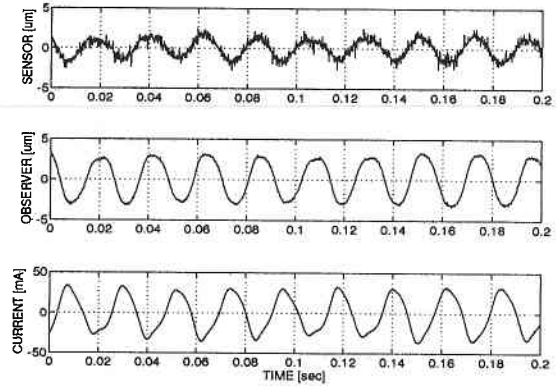


Fig. 8 Unbalance Response without Compensator

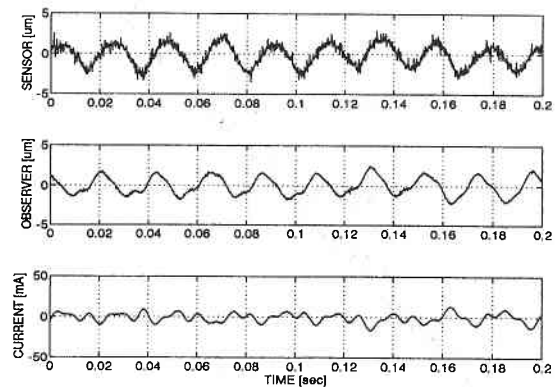


Fig. 9 With Unbalance Compensator (Current Regulation)

能であることが予想される。

現段階では、センサレス磁気浮上には一応成功しているものの、外乱が作用すると不安定になりやすくなる。この原因の一つとして、モデリングで無視した運動間の干渉の影響であると考えられる。

現在、これらモデル化で無視した部分を考慮に入れた正確なモデリングにもとづく制御の設計を行っている。

(1994年 8月22日受理)

### 参考文献

- 1) D. Vischer, H. Bleuler : A New Approach to Sensorless and Voltage Controlled AMBs Based on Network Theory Concepts, Proc. 2nd Int. Sym. Magnetic Bearings, 301/306 (1990)
- 2) T. Mizuno, H. Bleuler : A Geometric Approach to Control System Design of Self-Sensing Magnetic Bearings, 12th World Congress International Federation of Automatic Control, Vol. 4, 517/522 (1993)