

制御形磁気軸受の最近の開発動向

Recent Development of Active Magnetic Bearings

上山拓知 H. UEYAMA

Since 1983, research and development of active magnetic bearing technology have been carried out at Koyo R&D center. Digital control technology based on digital signal processor was applied to Koyo active magnetic bearing in 1995. Herein recent trend in development of active magnetic bearing is described.

Key Words: active magnetic bearing, digital control, monitor, diagnosis, performance

1. はじめに

回転体を電磁石の吸引力を調節する事で非接触に浮上支持する制御形磁気軸受(Active magnetic bearing)は1970年中頃より各種の産業用回転機械に使用され始めた。制御形磁気軸受には、その制御軸数により幾つかの種類があるが、ラジアル4軸(X1・Y1・X2・Y2)とアキシアル方向(Z)の合計5軸を制御する5自由度制御形磁気軸受が最も使用例が多い。制御形磁気軸受のもっとも成功した応用例としては、半導体製造装置に使用される機械式真空ポンプであるターボ分子ポンプが挙げられる。しかしながら、多くの変位センサや複雑な制御装置、電磁石駆動用の電力増幅器等が必要になる事などから製品価格も高く、他の応用分野にはその普及が進展していないのが現状であった。また、これらの用途では従来アナログ制御器が主として使用されてきているが、制御回路の伝達特性の調整等にも数少ない専門技術者が膨大な時間を費やさざるをえないことも高価格化の一因ともなっていた。

しかしながら、1990年以降になってデジタルシグナルプロセッサ(以下DSPと称す)の適用によるデジタル制御の導入により各種の産業分野での回転機械への適用例が増加してきている¹⁾。本稿では、制御形磁気軸受のデジタル制御を中心とした最近の技術開発動向と国際規格化について解説する。

2. デジタル制御化

近年のDSPに代表される高速デジタル演算処理技術の著しい発展により、この分野でもデジタル制御器の使用が増加し始めてきている。これには、制御系設計業務において強力なツールとなる

コンピュータ援用制御系設計プログラム等の周辺技術や環境の急速な進歩も見逃すことができない。また、表面実装技術や放熱設計の最適化により、従来大きな容積を占めていた制御装置全体も、回転駆動用のインバータを含めて非常に小型化してきており、回転機械の取り付け台に収容できる程度になってきている。図1にKoyo 5自由度制御・デジタル制御形磁気軸受システムの一例を示す。

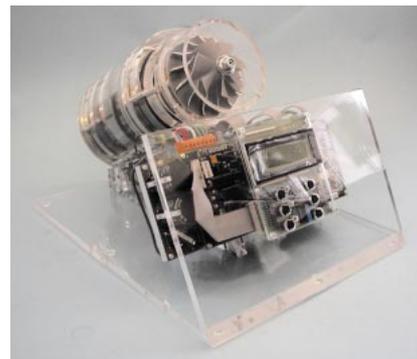


図1 Koyoデジタル制御形磁気軸受システム
Koyo digitally controlled AMB system

< 電子回路部 >

DSPボード

サイズ：100mm × 220mm

DSP：TMS320F240

制御軸数：5軸

サンプリング：10kHz

磁気軸受アンプ

サイズ：100mm × 250mm

容量：50V・3A × 10ch

モータドライバ(磁気軸受アンプ上)

容量：300W

LCD表示機能：20文字 × 4行

<機 構 部>

- 軸受構成：ラジアル軸受 2 対 × 2
- アキシャル軸受 1 対
- 主軸径：45mm
- モータ：DCモータ

3. デジタル制御による機能強化

アナログ制御系からデジタル制御系への技術移行はKoyo制御形磁気軸受に様々な変革や、磁気軸受システム自体の機能強化をもたらした。以下ではその幾つかの変革について解説する。

3.1 シリアル通信機能

Koyo制御形磁気軸受では、MAT2TMSというDSP通信ソフトを使用する事によりパーソナルコンピュータ(以下PCと称す)とコントローラに組み込まれたDSPボードとの通信機能が使用可能である。シリアル通信プロトコルは一般的なRS232C・RS485を使用している。図2にKoyo制御形磁気軸受の通信機能を含むシステム構成を示す。

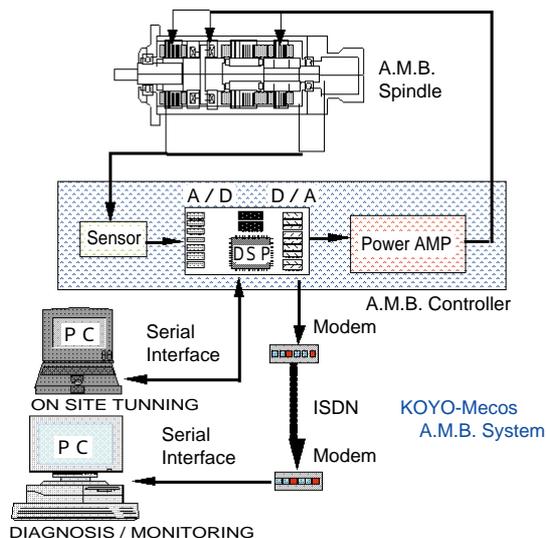


図2 Koyo制御形磁気軸受と通信システム構成

Koyo active magnetic bearing and system configuration

このシステムでは、モデムによるシリアル通信機能もサポートされており遠隔地からのシステムへのアクセスも可能である。以下に示すようなモニタと診断機能を実現している。

- 1) 異常履歴記録
- 2) 運転状態モニタ機能
- 3) 回転機械の診断機能

3.1.1 異常履歴記録

Koyo制御形磁気軸受では、磁気軸受作動中にDSPが検出した以下の異常内容につき、その異常が発生した日時・異常発生回転数・異常発生までのトータル運転時間/浮上時間/通電時間などの情報をDSPから自動的にフラッシュメモリに書き込みを実行する異常履歴の記録機能を備えている。

- 変位異常
- 回転パルス異常
- 駆動時の加速異常
- 軸受過負荷異常
- アンバランス警告・異常
- DSP/アンプの温度異常

フラッシュメモリに記録された異常内容はPCとDSPとの通信を実行するインターフェイスソフトによりその詳細情報の読み出しが可能であり、異常発生後の状況解析にその威力を発揮する事が可能である。

図3にこの「異常履歴記録」機能を利用してフラッシュメモリから読み出した異常履歴の例を示す。

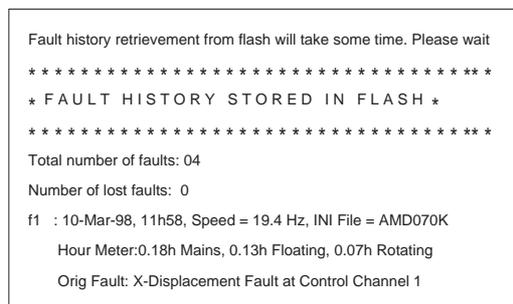


図3 異常履歴の例

Example of error history

3.1.2 運転状態モニタ

運転状態のモニタ機能は、MAT2TMSに標準装備されている図4に示すようなモニタ用ダイアログボックスのファンクションキーの押し操作により簡単に実行する事が可能になっている。

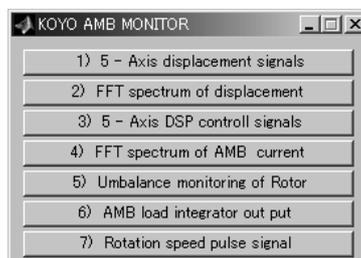


図4 運転状態モニタ用ファンクションキー

Function keys for monitoring operation state

この運転状態モニタファンクションキーでは、以下の各種運転状態のモニタが可能である。

- ラジアル・アキシアル変位信号
- 変位信号のFFT解析
- ラジアル・アキシアル電磁石電流信号
- 電流信号のFFT解析
- アンバランス量
- 軸受負荷
- 回転パルス信号

測定はファンクションキーのプッシュ操作で自動的に実行され、測定された時間波形・FFTデータ等は自動的にPC上の画面に専用のWindowが生成され表示される。

図5と図6に回転体のアンバランス量のモニタ例を示す。さらに、図7に回転パルスモニタ例を示す。

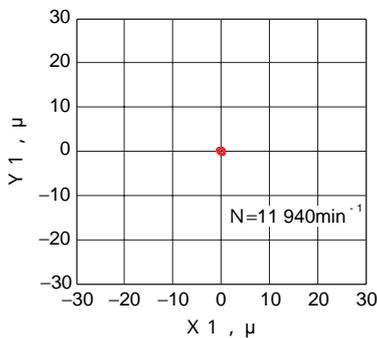


図5 X1 - Y1 でのアンバランスモニタ例
Example of measured unbalance in X1-Y1 plane

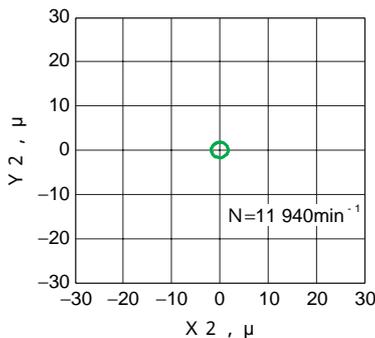


図6 X2 - Y2 でのアンバランスモニタ例
Example of measured unbalance in X2-Y2 plane

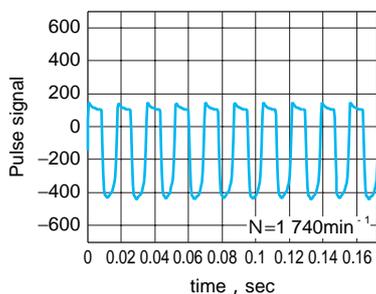


図7 回転パルスモニタ例
Example of measured rotation pulse signal

3.1.3 回転機械の診断機能

制御形磁気軸受は回転体の変位信号を検出して、浮上用電磁石の吸引力を制御するFeed Back制御系で構成されている。一般には、軸受で支持されている軸系の剛性を測定は加速度や変位センサとハンマリングなどによる接触式の測定に頼らざるを得ない。一方、制御形磁気軸受では、その既存のFeed Back Loop内で特に新たな測定用の信号入出力装置を付加することなく、次に示すような手法により制御形磁気軸受で支持された回転体の支持剛性を測定する事が容易に実行できる。

制御形磁気軸受で回転体を浮上支持させた状態で制御用DSPからの出力に回転体を加振するための加振信号を重畳させて出力させると、そのデジタル信号はD/A変換器を通じてアナログ量として電磁石駆動用の電力増幅器へ伝達され浮上用電磁石に入力される。浮上用電磁石は回転体の非接触支持を継続するが、加振信号成分は吸引力の変動成分となり加振力して回転体を揺さぶるが、揺さぶられた結果発生する回転体の変位は変位信号として再びA/D変換器からデジタル信号としてDSPへ入力される。こうした加振方式は制御形磁気軸受でのみ可能な方式であり著者らは「マグネティックハンマリング」と称している。

さて、剛性は一般的には周波数特性を有しているのが通例であり、次式で表現する事ができる。

$$K(\omega) = F(\omega) / X(\omega) \dots\dots\dots(1)$$

磁気軸受制御用のDSPでは、前述のように自らが出力した加振力(信号)=力(F)とその結果としての変位信号(X)の両方を同時に取得する事ができるため、加振周波数を希望の周波数に変化させながら、式(1)の演算をDSPで同時に実行する事が可能である。

こうして得られた周波数剛性特性には、回転機器の健全性判断、あるいは経年変化を把握するのに必要な情報が多く含まれている。

MAT2TMSでは回転機械の診断機能として、図8に示すような診断用ダイアログボックスが装備されておりその剛性特性が測定可能である。



図8 回転機械の診断用ダイアログボックス
Dialogue box for diagnosis of rotary machine

このダイアログボックスからは、
 X 1 または、Y 1 制御軸での剛性
 X 2 または、Y 2 制御軸での剛性
 Z 方向制御軸での剛性
 の測定が可能である。
 図9、10、11にそれらの一例を示す。

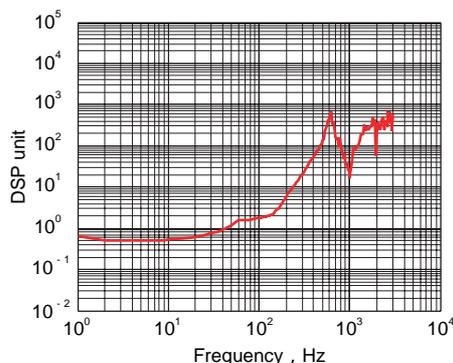


図9 X 1 方向での剛性特性測定例
 Example of measured dynamic stiffness in X1

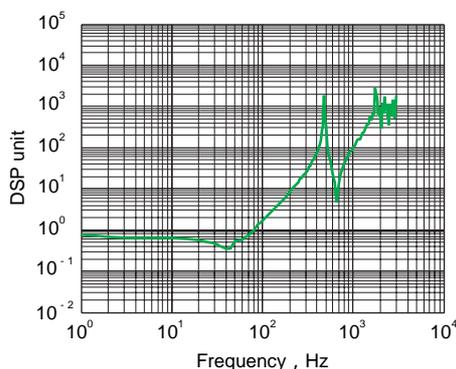


図10 X 2 方向での剛性特性測定例
 Example of measured dynamic stiffness in X2

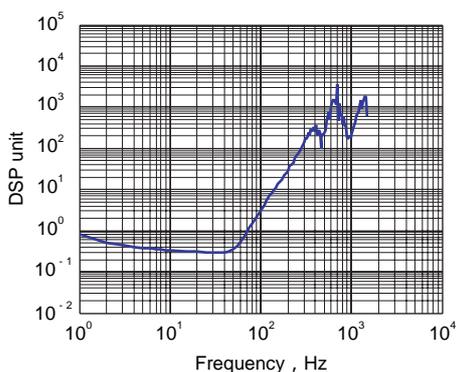


図11 Z 方向での剛性特性測定例
 Example of measured dynamic stiffness in Z

制御形磁気軸受では、通常、磁気軸受非動作時に回転体を支持する目的で保護用のタッチダウン軸受と呼ばれる転がり軸受が併用される。回転体とタッチダウン軸受との半径方向クリアランスはセンサや電磁石との半径方向クリアランスよりも小さく設定されており、タッチダウン軸受と回転体が接触している状態でも回転体とセンサや電磁石との接触は発生しないように構成される。

すなわち、こうした構成の制御形磁気軸受では、

- (1) タッチダウン軸受の中心 = 浮上位置
- (2) センサの中心
- (3) 電磁石の中心

が存在する。制御形磁気軸受が回転体を半径方向あるいはアキシャル方向に支持する浮上位置は、タッチダウン軸受のクリアランスの中心を目標位置として制御されるのが一般的である。

しかしながら、こうした各機械的中心は通常機械的加工精度の公差範囲でわずかに一致しない。また、各部品を組み立て精度に起因する組み立て誤差での中心不一致も存在する。さらに各変位センサのバラツキや、電磁石コイルの巻き線数の誤差などによる電氣的なアンバランスや不一致とともにその磁気軸受性能へ影響を及ぼし、性能低下にも繋がる可能性も否定できない。

Koyo制御形磁気軸受では、タッチダウン軸受の中心と電磁石の中心との誤差を以下の方式で確認する診断用機能も使用できる。

回転体が電磁石中心に浮上している場合には、各制御軸で対向している電磁石に流れる制御電流は全く等しくなる。しかし、電磁石の中心に浮上していない場合には、これらの制御電流はもはや等しくない。この対向する制御電流の差は、DSP制御系での積分出力により出力されている。すなわち、積分出力の差からタッチダウン軸受の中心と電磁石の中心との誤差を推定する事も可能である。さらには、浮上位置を変化させる事によりこの積分出力が「ゼロ」になる浮上位置を探す事も可能である。(磁気中心の検出)

MAT2TMSでは図12に示すダイアログボックスを装備しており、磁気中心の検出が非常に短時間で可能である。

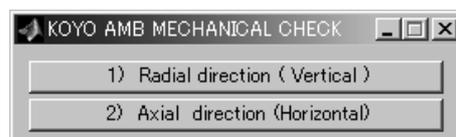


図12 磁気中心測定用ダイアログボックス
 Dialogue box for measuring magnetic center

図13, 14, 15にそれらの測定例を示す. この例ではラジアル方向の場合, 測定された磁気中心位置が小さいで表示されておりX1 - Y1では2ミクロン, X2 - Y2では20ミクロンのズレがある. ズレ許容値も同時に表示されており, いずれも規定値と判断されている. 一方, Zではズレが検出されていない. こうした, 磁気中心検出機能はMAT2TMS使用時だけでなくDSP単独でも実施できる.

以上のモニタ・診断機能は, 製品出荷後だけでなく, 製品出荷前の品質管理にも効率的に使用できる. また, Koyo制御形磁気軸受のOEMユーザもMAT2TMSの使用によりKoyo制御形磁気軸受が搭載された最終回転機器の品質管理にも威力を発揮するためそうしたユーザへはライセンスを開放している.

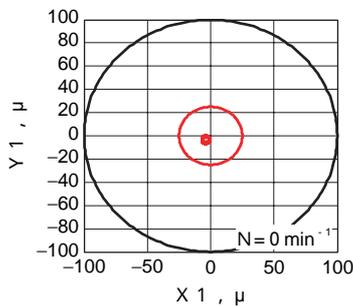


図13 X1 - Y1での磁気中心測定例

Example of magnetic center in X1-Y1 plane

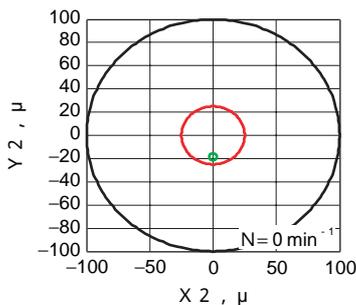


図14 X2 - Y2での磁気中心測定例

Example of magnetic center in X2-Y2 plane

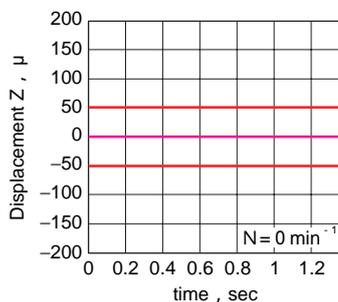


図15 Z方向での磁気中心測定例

Example of magnetic center in Z direction

以下の機能については特に各機能のサポートに専用のIC等をハード的に増設する事なく, 磁気軸受制御用のDSPにおける演算余剰機能を使用して実現しており, それぞれの機能サポート用にマイコン等を使用するシステムに比較して制御装置全体のコストを抑える事が可能である.

3.2 LCD・インターフェイス制御

Koyo制御形磁気軸受では, 制御装置の前面パネルに設けられた液晶表示装置(LCD)から表1に示すような様々な運転情報・内部パラメータ・設定情報にアクセスし表示・設定する事が可能である. 通常LCDは実回転数を表示するNORMAL表示であるが, MODE/UP/DOWN/ENTERの4つのスイッチ操作により表1に示すようなメインメニュー・サブメニューへアクセスする事ができる.

これらのLCDメニューは, 別機能の追加時等必要に応じてフレキシブルに変更・改良も可能である.

表1 Koyo制御形磁気軸受LCD標準メニュー

Menu structure of LCD in Koyo AMB

NORMAL 表示 実回転数

Act Spd : 1 000Hz
UFRC ON



M01	Param Input	センサ自動調整設定 シリアル通信設定 回転数設定* 温度制御指令**
M02	Signals	アンバランス 磁気軸受負荷状態 モータ運転状況 温度モニター
M03	Hour Meter	積算通電時間 磁気浮上時間 回転時間
M04	Time & Date	現在時間表示 時間設定変更 日付設定変更
M05	Cal Values	センサ調整情報
M06	Calibration	センサ自動調整要求
M07	Fail Hist	異常履歴表示
M08	Alarm	アラーム(警告)情報
M09	SN & Ver #	シリアル番号等表示
M10	Maintenance	メンテナンスコール

* インバータ制御機能使用時

**温度制御機能使用時

3.3 インバータ制御

真空ポンプ用の制御装置では, ポンプに内蔵のモータを駆動する高周波インバータが搭載されるが, ここでも磁気軸受制御用のDSPはその演算

余剰機能を利用しインバータ制御部の幾つかの演算機能を実行している。これにより、磁気軸受の制御特性にあわせたモータ駆動特性の実現も容易に達成できるだけでなく、真空ポンプ用モータに必要となる特殊な駆動特性も実現している。

MAT2TMSではこのインバータ制御用のダイアログボックスも装備しており、モータの起動・停止・フリーラン指令や、目標回転数の設定もこのダイアログボックスより可能である。



図16 インバータ制御用ダイアログボックス
Dialogue box for controlling motor drive

3.4 温度調節器制御

半導体製造用に使用される真空ポンプでは各種のプロセスガスを排気する関係上、化学反応生成物が回転体に付着することがある。こうした化学反応生成物の回転体への付着を防止するためポンプ自体にバンドヒータ等を装着してその温度を昇温させる機能が一般的に採用されている。こうしたヒータではその温度を適度に調節するため、ポンプ温度を測定してヒータへの入力電力を制御し、真空ポンプの温度を適温に保つ制御機能が必要である。Koyo真空ポンプ用制御形磁気軸受制御装置では、この温度調節機能も、磁気軸受制御用DSPを使用して実現している。(USA/台湾特許取得済み)

4. 汎用・磁気軸受コントローラ

制御形磁気軸受のさらなる普及には、前述したようなユーザフレンドリーなハード・ソフト構成だけでなく、低価格化ももちろん重要なファクターである事は自明である。しかしながら、制御形磁気軸受はこれまでどちらかと言うとテラメイド的な性格が強く、個々のユーザ要求を満足するハード構成をそのつど設計する傾向が強かった。デジタル制御の採用はこうした面でも変革をもたらす事が可能であると期待される。

例えば、デジタル制御形磁気軸受電子回路部の最低限のハード構成としては、

- センサ回路
- A / D回路
- DSP
- D / A回路
- シリアル通信部

LCD表示部

その他のデジタルI/O部

電力増幅器

が主要構成回路要素となる。このうち、の電磁石駆動回路は軸受負荷条件や、制御周波数帯域によりその駆動容量仕様が異なる事が想定されるが、残る電子回路部はパワー電力部が無く共通化は十分可能であろう。

Koyo制御形磁気軸受ではこうしたコンセプトを元に、コントローラ(電子回路)の低価格化を目指し、からまでの電子回路部を汎用磁気軸受制御DSPボードとし、用途に合わせてのデジタルI/O部と電力増幅部を組み合わせるパーツの共有化・コンポーネント化を実施している。その結果として近い将来、Koyo制御形磁気軸受ではシリーズ化された汎用・磁気軸受コントローラから容易にユーザがコントローラを選定できよう。

図17にKoyo汎用磁気軸受コントローラType/MDCA3Aの外観図を示す。

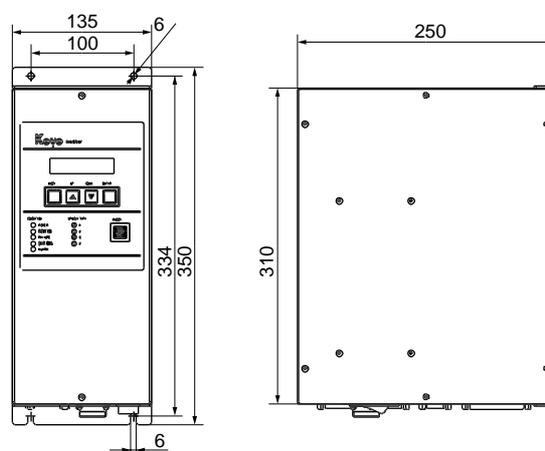


図17 汎用磁気軸受コントローラ MDCA3A

General purpose active magnetic bearing controller MDCA3A

従来のアナログ制御磁気軸受では、回転機と制御装置の組み合わせが変更されると、変位センサの校正・調整が必要であった。開発されたKoyo汎用磁気軸受コントローラではデジタル制御系の採用により変位センサの調整を自動的に実行するチューニングフリー・マッチングフリー・起動モードが選択できるようになっている。すなわち、前述のように、からまでの電子回路部が集積されたDSPボードにより、変位センサの発振回路制御もDSPが担当しており、発振周波数の変更や変位センサとしてのゲインやオフセット信号の調節も自動的に実行でき、一切のトリマ調整作業が不要となっていることによる。

さらに、このコントローラでは4つの異なる制御パラメータセットを同時に記憶可能であり、4種類の回転体を自動判別して起動するカップリングフリーが可能である。

5. 制御形磁気軸受に関する国際規格化

1997年に入って以降、広く制御形磁気軸受が産業機械に応用される事を目的として制御形磁気軸受の国際規格化も活発化してきた。現在、ISO・TC 108「機械の衝撃と振動」に関するテクニカルコミッティー・SC 2(サブコミッティー)のもと、WG 7(ワーキンググループ)にこの分野の専門家が各国から召集されドイツ規格協会DINとも連携をとりながら、幾つかの国際規格化作業が進められている。なお、このWG 7のコンビーナは日本の防衛大学校・機械工学科教授の松下修先生がご担当されており、日本が幹事国として主導を取って進めている最初の国際規格として、特筆すべき規格であろう。

また、日本国内でも日本機械学会のもと、同じく松下先生が主査を務める磁気軸受標準化委員会も活動しており、産業用機械部品としてあるべき標準化の方向も積極的に探求されている。その、活動内容のひとつとして本年「磁気軸受設計マニュアル」²⁾が磁気軸受標準化委員会より発行されている。

5.1 制御形磁気軸受の用語の定義 (ISO 14839-1)³⁾

本規格は、特に制御形磁気軸受における技術用語やセンサ・アクチュエータ(電磁石)・コントローラにおける機能部品の名称などを決定するとともに、それらの定義を実施したものである。なお、本規格は、すでに昨年ISO加盟各国の投票結果を受けて、2002年に国際規格として成立している。本国際規格が、「翻訳され日本規格協会よりJIS規格として制定される日もそう遠くはないと思われる。表2に制御形磁気軸受の主な部品用語を示す。

表2 制御形磁気軸受の主な部品用語

Typical part terminology of active magnetic bearings

固定子側	回転子側
ラジアルステータ	ラジアルロータコア
ラジアルセンサ	ラジアルセンサターゲット
アキシアルステータ	アキシアルロータディスク
アキシアルセンサ	アキシアルセンサターゲット

なお、制御形磁気軸受の大きな特長のひとつとして、回転体の慣性主軸回りに回転体が回転するようにラジアル方向磁気軸受を制御する技術が知られているが、これはフランスの磁気軸受専門メーカーが開発したABS(オートマチックバランシングシステム)として有名である。しかしながら、このラジアル方向磁気軸受の制御技術は、自動的にバランスを取るのではなく実際には回転体のアンバランス振動を抑制する制御であるという観点から、本国際規格では「アンバランス振動力抑制制御」(Unbalance force rejection control: UFRC)として用語が定義されたので付記しておく。

5.2 制御形磁気軸受における振動評価 (ISO 14839-2 予定)

本規格の目的は制御形磁気軸受を搭載した回転機械における回転時の振動(振れ)を規定する事にある。本規格で制定される予定の回転時の振れ基準はタッチダウン軸受の半径方向クリアランスに対する割合(%)によってA, B, C, Dの4段階のゾーンに類別されている。表3に本規格案に基づく磁気軸受搭載回転機の振動基準を示しめす。Koyo制御形磁気軸受では、この振動規格案に準じてZone Aを超えると変位・振動レベルの警告信号を、Zone Cを超えると変位異常信号をコントローラから出力するようにプログラムされている。図18に半径方向クリアランスが100ミクロンの場合のKoyo制御形磁気軸受での警告レベル(青)と異常レベル(赤)を示す。なお現在、この国際規格案はワーキンググループドラフトの最終段階である。

表3 制御形磁気軸受搭載回転機の振動基準 (振動値は、半径方向クリアランスに対する値。)

Regulation of vibration for rotary machine equipped with active magnetic bearing

Zone	振動値	備考
A	30%以下	新設の回転機械
B	40%以下	なお長時間の運転可能
C	50%以下	短時間の運転可能
D	50%超	停止すべき範囲

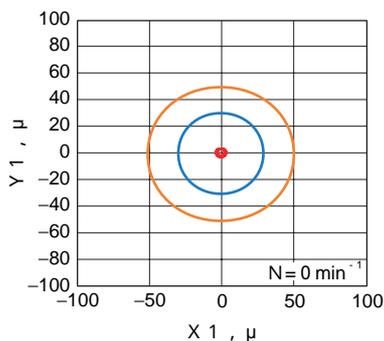


図18 Koyo制御形磁気軸受での警告レベル(青)と異常レベル(赤) (半径方向クリアランス = 100ミクロン)

Warning unbalance level and failure unbalance level in Koyo AMB

5.3 制御形磁気軸受における安定性評価 (ISO14839 - 3 予定)

電磁石の吸引力を制御して回転体を浮上させる制御形磁気軸受では、回転体の1次・2次曲げ振動をどのように安定化させるかがその技術の中核といっても過言ではない。さて、本規格の目的は表題のように、制御形磁気軸受を搭載した回転機械における軸受安定性の評価を規定する事にある。現在のところ、ワーキンググループでも活発に規格化内容が検討されているが、制御系からみた感度関数により安定性評価の判断基準が制定される予定である。

6. おわりに

今後、制御形磁気軸受は本総説で示したように、デジタル制御の適用拡大により1)制御系設計の柔軟化・調整作業の短時間化、2)汎用コントローラに代表される同一ハード(DSP)の利用による量産効果で低価格化されていくとともに、制御形磁気軸受の特殊機能である、3)アンバランス力抑制制御、4)浮上状態・回転状態・作用力のモニタ、5)回転体の診断機能などの機能強化要素、6)変位センサの自動調節機能(チューニングフリー)、7)制御系の回転体判別機能の付加(マッチングフリー)などの使用簡便性などとあいまって産業用回転機械への応用場面も増加すると思われる。また、その国際規格化も本格的に進む中、さらにその普及も加速していくものと予想される。

参考文献

- 1) 計測と制御, no. 12(1998).
- 2) 磁気軸受設計マニュアル 日本機械学界磁気軸受標準化委員会編纂.
- 3) ISO14839 - 1 制御形磁気軸受の技術用語.

筆者



上山拓知*
H. UEYAMA

* 軸受事業本部 ユニット技術部