

磁気軸受適用遠心圧縮機の開発

佐成弘毅・馬場祥孝・宮地利和・黒橋道也(工博)

機械事業部・開発部

Development of a Centrifugal Compressor Equipped with Magnetic Bearings

Hiroki Sanari・Yoshitaka Baba・Toshikazu Miyaji・Dr. Michiya Kurohashi

A centrifugal compressor equipped with digitally controlled magnetic bearings was developed. Test operations on the developed compressor were carried out, and stable operation up to a maximum continuous speed of 12 054 rpm was confirmed. It was also demonstrated that each synchronous vibration level of the shaft position and bearing current could be reduced by applying of Adaptive Vibration Control (AVC) to the magnetic bearings. The function of the touchdown bearings supported by damping materials was confirmed touchdown tests at a maximum continuous speed of 12 054 rpm .

まえがき = 磁気軸受は、その優れた特長により、大型のターボ機械への適用も拡大してきている^{1)~3)}。その中で磁気軸受のコントローラとして、従来はアナログ方式が多くもちいられているが、最近ではデジタル方式のコントローラの適用も種々検討されてきている⁴⁾。

本稿では、デジタル制御磁気軸受を遠心圧縮機に適用した例につき、まず、ロータの振動設計を含めた試作圧縮機の概要について述べる。次に、試作圧縮機に採用したデジタル磁気軸受コントローラの構成と、その機能の一つである適応振動制御機能(AVC)について説明する。そして、工場内で実施した各種テストのうち、磁気軸受の制御系の調整および特性確認のためにおこなった静止浮上テストと、定常運転における機械的安全性を確認する無負荷および負荷状態での運転テストの結果を示す。また、適応振動制御(AVC)の機能および有効性確認のためにおこなったAVCテスト、および磁気軸受の機能停止時に圧縮機の回転停止までロータを支持する補助軸受の機能を確認するために実施したタッチダウンテストについて、それぞれの結果を説明する。

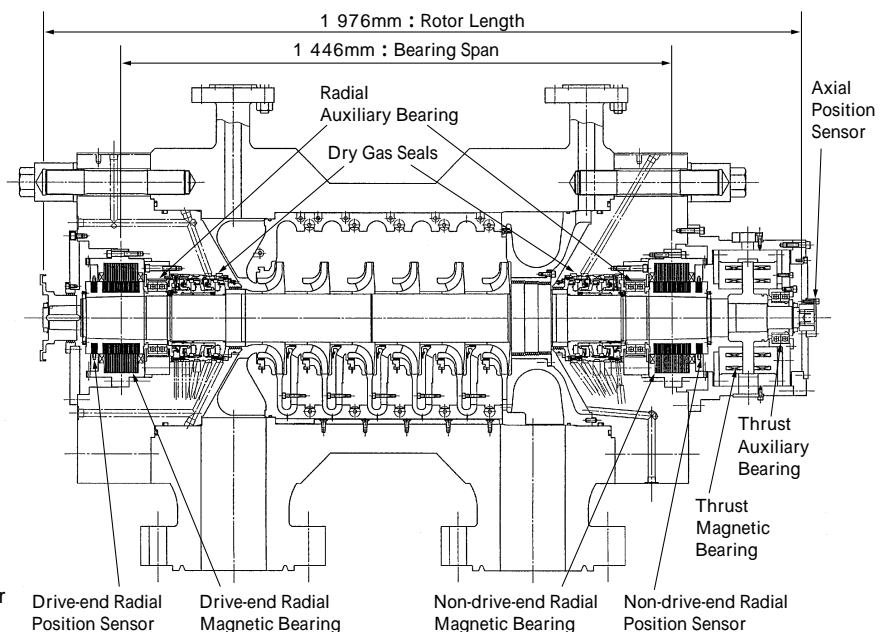
1. 試作圧縮機の概要

試作した遠心圧縮機は、石油精製プラントなどで使用される高圧の水素圧縮機⁵⁾である。従来の油軸受および油膜シールに代えて、磁気軸受およびドライガスシールを採用して、設計および製作をおこなった。試作圧縮機の外観を写真1に、断面図を第1図に、仕様を第1表



写真1 試作圧縮機の外観

Photo 1 Outside view of developed centrifugal compressor



第1図 試作圧縮機の断面図

Fig. 1 Sectional view of compressor assembly

第 1 表 遠心圧縮機の仕様

Table 1 Specifications of centrifugal compressor

Model	VH106	
Gas	Hydrogen and Hydrocarbon	
Suction Volume	m ³ /h	1 453
Suction Pressure	MPaA	16.0
Discharge Pressure	MPaA	17.6
Rated Speed	rpm	11 480
Speed Range	rpm	8 610 ~ 12 054
Rated Power	kW	1 250

第 2 表 磁気軸受の仕様

Table 2 Specification of magnetic bearings

Radial Bearing		
Diameter	mm	189.0
Length	mm	88.9
Radial Clearance	mm	0.50
Thrust Bearing		
Outer Diameter of Stator	mm	292.1
Inner Diameter of Stator	mm	152.4
Axial Clearance	mm	0.76

に示す。

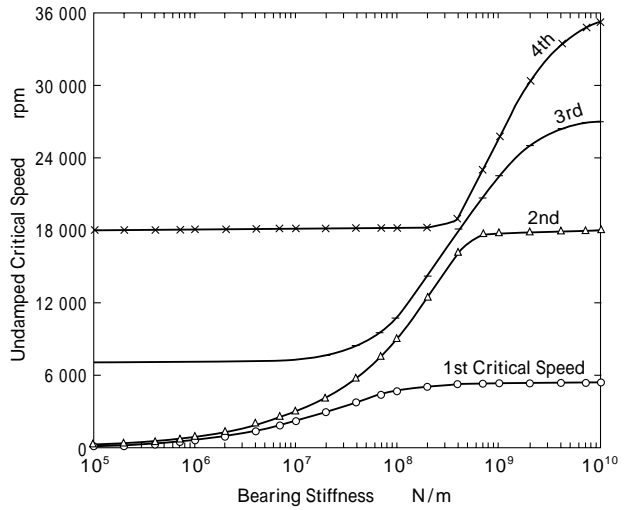
試作圧縮機の構造としては、パレル型のケーシング構造を持ち、ロータには 6 段のインペラを有している。ロータ重量は約 350kg、ロータ全長は約 2 000mm である。磁気軸受は、軸の両側にラジアル磁気軸受、反駆動側のラジアル磁気軸受の外側にスラスト磁気軸受を配置している。ラジアルおよびスラスト磁気軸受の仕様を第 2 表に示す。補助軸受には転がり軸受をもちい、ラジアル補助軸受をラジアル磁気軸受の内側に、スラスト補助軸受を反駆動側の軸端に配置した。ラジアル補助軸受の転がり軸受の外周には、軸受ホルダを介してハウジングとの間に減衰材を設置している。この減衰材は、回転中の磁気軸受の機能停止にともなう補助軸受支持による停止操作、いわゆるタッチダウン状態でのロータの過大なふれ回りを防止するよう設置してある⁶⁾。なお、軸封としてのドライガスシールは、タンデム型で、両方向回転可能なものを採用している。

ロータ設計においては、磁気軸受の動特性も含めた振動解析⁷⁾を実施し、十分な検討をおこなった。本圧縮機のロータは、第 2 図の非減衰危険速度線図に示されるように、常用回転数が 3 次(曲げ 1 次)と 4 次(曲げ 2 次)の危険速度の間に存在する弾性ロータとしている。

2. デジタル磁気軸受コントローラ

今回採用した磁気軸受システムは、フルデジタル方式の磁気軸受システム⁸⁾である。コントローラの外観を写真 2 に、また、システムの概略構成図を第 3 図に示す。

本システムの浮上、回転時の安定性を確保するための制御方法は、位置センサからの信号に基づく各軸独立の PID 制御を基本とし、2 次ローパスフィルタ、1 次位相進み要素、ノッチフィルタ、軸受コイルの時間遅れを改善させるための電流マイナードバック回路などから構成されている。これらの制御則は DSP (Digital Sig-



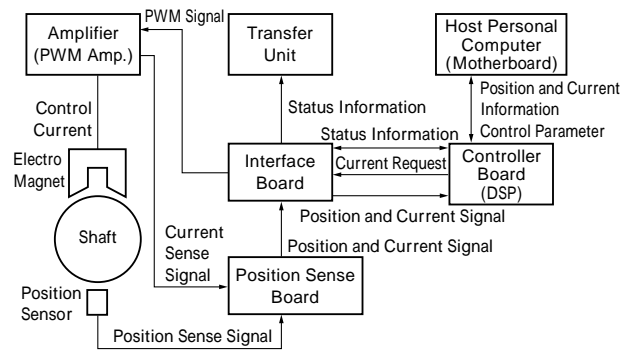
第 2 図 非減衰危険速度線図

Fig. 2 Undamped critical speed map



写真 2 コントローラの外観

Photo 2 Outside view of magnetic bearing controller



第 3 図 磁気軸受システム構成図

Fig. 3 Magnetic bearing system diagram

nal Processor) にプログラムとして書き込まれ、アンプから磁気軸受に流れる電流をコントロールしている。DSP 上の制御則におけるゲインなどのパラメータは、磁気軸受が作動中であっても、パーソナルコンピュータを介したインターフェースソフトにより自由に変更する

ことができ、いわゆる制御系のチューニング作業を容易におこなうことができる。第4図に、インターフェースソフトの制御系パラメータ設定画面を示す。また、インターフェースソフトには、この制御系パラメータ設定機能に加えて、磁気軸受の運転状態のモニタリング機能、軸受クリアランスの確認および軸心位置調整機能、アラームレベルの設定機能、アラーム発生前後の運転状態記録機能などが備えられている。さらに本システムにはこれらの基本的な機能に加えて、次章に示す適応振動制御機能が備えられている。



第4図 制御系パラメータ設定画面
Fig. 4 Tuning screen of interface software

3. 適応振動制御機能 (AVC)

今回採用の磁気軸受システムが有する適応振動制御機能^{9)~12)}(以下、AVC: Adaptive Vibration Control と表す)は、米国バージニア大学にて開発された手法を適用したもので、不釣合いによる回転同期の振動を減少させるものである。ここでは、その動作と特徴につき簡単に説明する。

AVCの一連の動作原理は以下のとおりである。まず、軸受からロータに加えられる回転同期の力と、それに対してロータ系に生じる軸振動応答との関係を表す影響係数を、磁気軸受によりあらかじめ定められた回転同期の加振力をロータに加えて、その結果としてえられる軸振動応答の測定結果から最小自乗法により推定する。次に、推定した影響係数と現在の回転同期の軸受力和軸振動をもちいて、軸振動を最小化するように定められた適応アルゴリズムにしたがって回転同期の軸受力の修正量を求めて、ふたたび磁気軸受を介してロータに作用させる。この回転同期の軸受力の修正を周期的に繰り返すことで回転同期の軸振動は漸近的に最小化される。ここで、回転同期の振動測定および軸受力発生のために必要な位相情報は回転パルス間隔を計測するタイマにより検出される。AVCのもう一つの方法として、制御対象を回転同期の軸振動の代わりに、軸受電流の回転同期成分として同様の制御をおこなうことにより、同電流成分を極小化することもできる。この場合は、結果的にロータから軸受ハウジングへの回転同期の振動伝達が低下することになる。今回は、その両者をそれぞれに応用した。

このAVCは、先に示した安定性確保のための基本制

御系(フィードバック制御系)にフィードフォワード的に加算されるため、ロータ系全体の安定性には影響しない。また、影響係数はロータ系の特性を表すものであるため、系の特性が変化した場合、たとえば回転数が大きく変化したり、磁気軸受の制御パラメータをいちじるしく変更した場合などには追従できず、影響係数の推定をやり直す必要がある。いっぽう、系の特性が変わらない変化、たとえば不釣合いの変化などには、回転同期振動を低下させるために発生させている軸受力を周期的に更新しているため、追従することが可能である。なお、現在では回転数変化に追従可能なAVCも開発されている。

4. 工場内テスト結果

試作した遠心圧縮機の機械的な安定性および信頼性を確認するために、工場内で以下の各種試験を実施した。

- ・静止浮上テスト
- ・起動停止および定常運転テスト
- ・AVCテスト
- ・不釣合い応答テスト
- ・サージテスト
- ・タッチダウンテスト
- ・連続運転テスト(軸受昇温テスト)
- ・防爆電気機器認定取得試験

これらテストは、すべて問題なく完了した。ページ数の都合により、これらテスト結果のうちの一部について、以下に説明する。

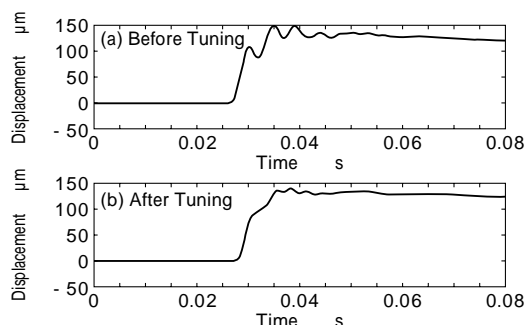
4.1 静止浮上テスト

運転前の静止浮上テストでは、安定した静止浮上が可能であり、かつ、運転周波数範囲内の振動特性が良好となるよう、ステップ応答の測定や加振テストによる特性確認をおこないながら、制御系のパラメータ調整を実施した。

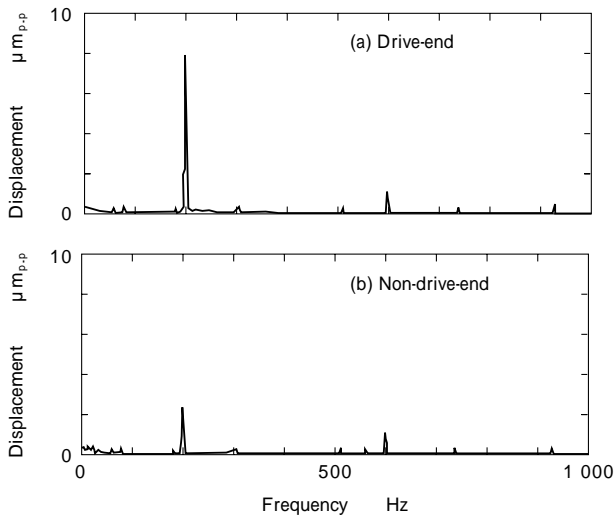
第5図は、制御系の調整前後での、目標軸位置のステップ状変化に対する応答(ステップ応答)の測定結果の一例である。同図に示されるように、制御系のパラメータの調整により、振動特性は改善されたことがわかる。なお、デジタルコントローラをもちいたことにより、このような制御パラメータの変更作業は、容易におこなうことが可能であった。

4.2 定常運転時および停止過程の軸振動

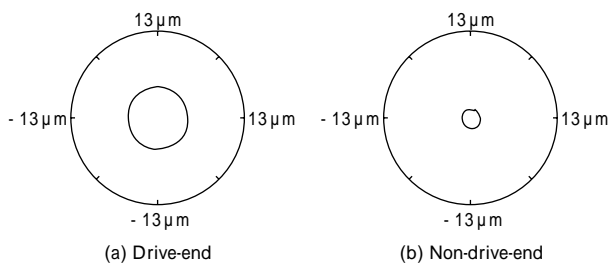
静止浮上テストに引き続いて、大気による無負荷の運転テストと、ヘリウムおよび窒素による負荷運転テスト



第5図 静止浮上状態でのステップ応答(駆動側)
Fig. 5 Step response in static levitation at drive-end position sensor



第6図 軸振動の周波数分析結果
Fig. 6 Frequency spectrum of rotor vibration



第7図 回転同期軸中心軌跡
Fig. 7 Orbit of synchronous rotor vibration

を実施した。ヘリウムガスにて最大連続回転数 12 054 rpm, 吸込圧力 3.32 MPaG, 吐出圧力 3.87 MPaG, 定格流量付近で軸動力約 350 kW の運転における磁気軸受位置センサで測定した軸振動の周波数分析結果を第6図に示す。また、このときの軸中心軌跡を第7図に示す。軸振動は、回転数成分が主成分で、振動値も十分低い値であり、安定運転可能であることが確認された。

第8図は、12 054 rpm からのロータ停止過程における回転数同期成分の振動変化を示したものである。この図からわかるように、本圧縮機は運転回転数範囲内で振動が過大となることもなく、良好な振動特性となっている。

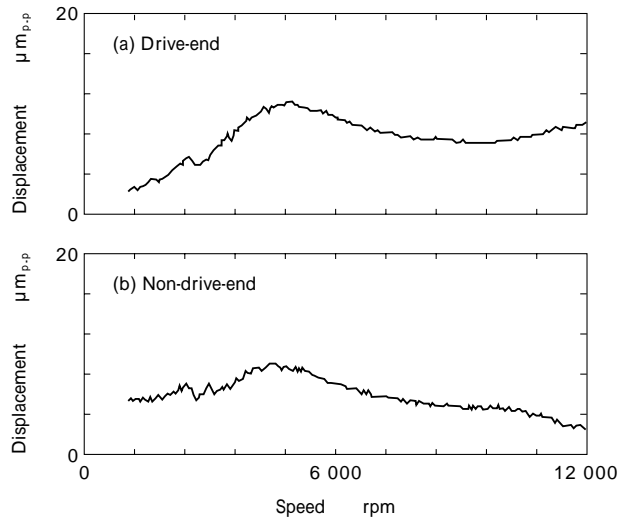
4.3 AVC テスト

AVC テストは、無負荷および負荷運転状態にて、回転同期軸振動の低減テストと、回転同期軸受電流の低減テストのそれぞれをおこなった。

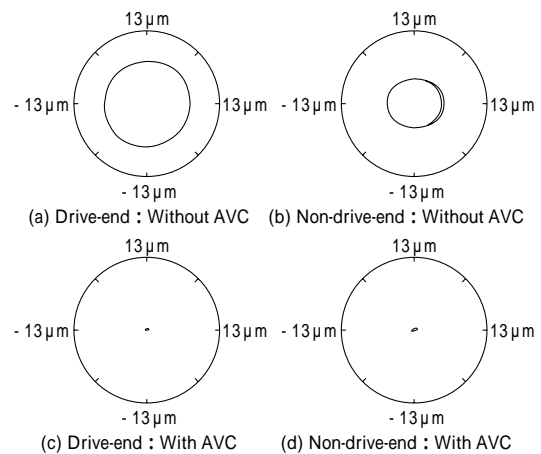
4.3.1 回転同期軸振動の低減テスト

第9図は、回転数 12 054 rpm で大気による無負荷運転中に磁気軸受の位置センサで測定した回転同期の軸中心軌跡である。図中、(a) (b) は AVC を作動させない状態での軸中心軌跡であり、(c) (d) に示される AVC を作動させた状態での軌跡は大幅に小さくなっていることがわかる。

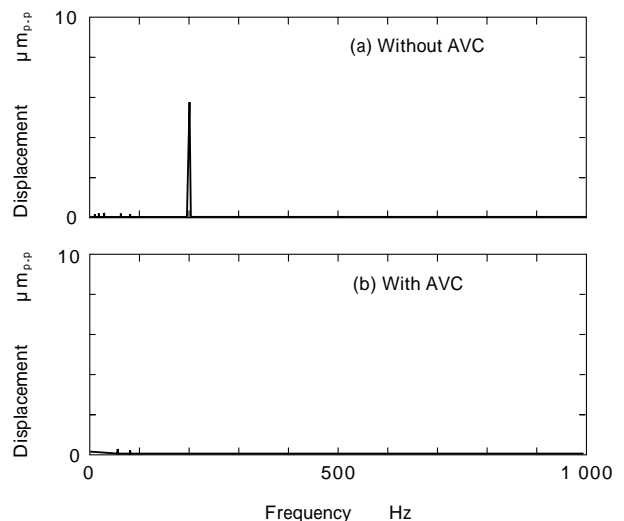
第10図は、第9図の測定と同時に起こった駆動側磁気軸受の位置センサで測定した軸振動の周波数分析結果である。回転周波数 200 Hz の振動成分が、AVC を作動させることによりほとんど検出できないほど小さくなっている。



第8図 停止過程における振動応答
Fig. 8 Vibration response during decreasing speed



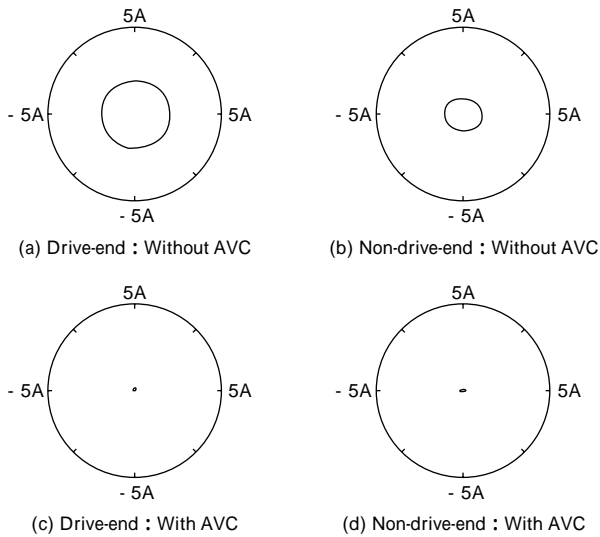
第9図 回転同期軸中心軌跡
Fig. 9 Orbit of synchronous rotor vibration



第10図 駆動側軸振動の周波数分析結果
Fig. 10 Vibration spectrum at drive-end position sensor

4.3.2 回転同期軸受電流の低減テスト

第11図は、磁気軸受の電流センサで測定した、回転数 12 054 rpm にて大気による無負荷運転中の回転同期の軸受電流の軌跡である。図中、(a) (b) は AVC を作動させない状態での同期軸受電流の軌跡であり、それに対して (c) (d) に示される回転同期軸受電流を低減させる



第11図 回転同期軸受電流軌跡
Fig. 11 Orbit of synchronous bearing current vibration

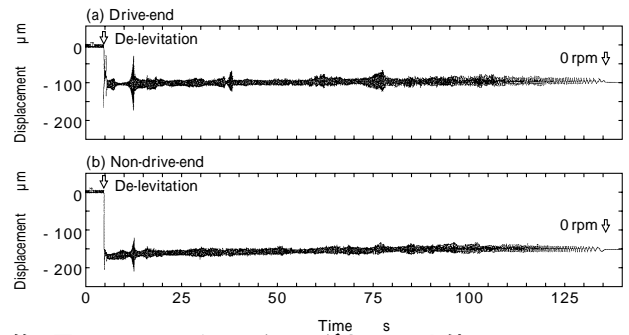
AVC が作動している状態での電流軌跡は大幅に小さくなっている。また、このときケーシングおよび軸受箱の振動は、いちじるしく低下していることが観察された。

4.4 タッチダウンテスト

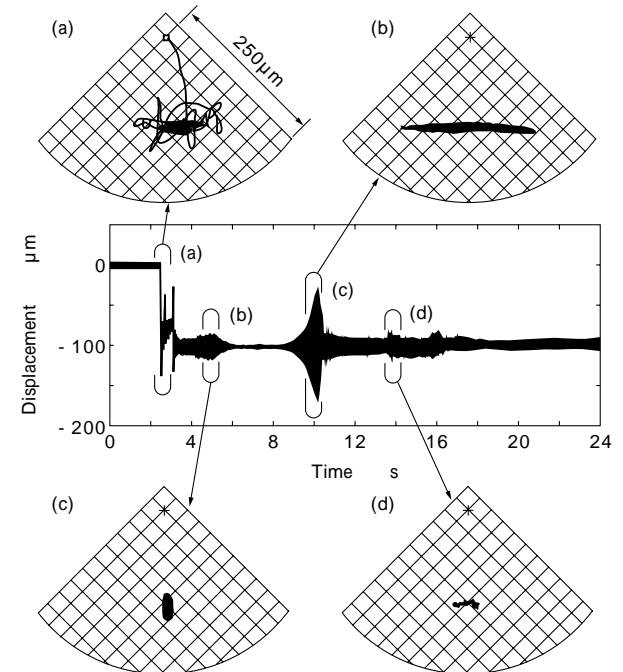
磁気軸受支持状態での各種テストに引き続いて、補助軸受の機能確認のために、運転中の磁気軸受の機能停止にともなう補助軸受支持での緊急停止過程を模擬したタッチダウンテストを実施した。テスト結果の一例として、ヘリウムガスにて最大連続回転数 12 054rpm 吸込圧力 3.35MPaG 吐出圧力 3.92MPaG 軸動力約 380kW の運転状態から、磁気軸受の電源を遮断すると同時に駆動機を停止することにより実施したタッチダウンテストにおいて、磁気軸受位置センサで測定した軸変位の時間波形を第 12 図に、駆動側軸中心軌跡を第 13 図に示す。測定結果が示すように、タッチダウン開始から回転停止までに何度かの振動増加が見られるが、過大なふれ回りなどを生じること無く停止していることがわかる。

なお、各種運転条件での最大連続回転数 12 054rpm からの合計 8 回におよぶ連続したタッチダウンテストを実施した後の分解点検においては、転がり軸受の内輪および同軸受に接触する軸スリーブに軽微な接触痕がみられたのみで、補助軸受の機能に問題はないことを確認した。

むすび = デジタル制御磁気軸受を適用した遠心圧縮機を試作して各種テストを実施した。無負荷および負荷運転テストにて安定運転が可能であること、および運転中の磁気軸受機能停止による緊急停止過程において安全に停止するまでロータを支持する補助軸受の機能をタッチダウンテストにより確認して、回転機械としての信頼性を確認した。また、デジタル制御コントローラを採用したことにより制御系のパラメータ変更が簡単にでき、チューニング作業を容易におこなうことができた。さらに適



第12図 12 054rpm からのタッチダウンテスト結果
Fig. 12 Vibration response during touchdown test from 12 054 rpm



第13図 タッチダウンテスト時の軸中心軌跡 (駆動側)
Fig. 13 Orbit during touchdown test at drive-end position sensor

応振動制御機能は、回転同期の軸振動、または軸受電流をいちじるしく減少させることができ、回転機械としての静粛な運転維持に有効であることを示した。

参考文献

- 1) 加納文質ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.43, No.3 (1993), p.95.
- 2) 金光陽一ほか: ターボ機械, Vol.22, No.8 (1994), p.42.
- 3) 福島康男ほか: ターボ機械, Vol.24, No.3 (1996), p.35.
- 4) Schmied, J. et al.: Proc. Revolve '94, (1993).
- 5) 伊藤三彦ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.41, No.1 (1991), p.39.
- 6) Tessier, L. P.: Proc. MAG '97, (1997), p.120.
- 7) 馬場祥孝ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.48, No.2 (1998), p.26.
- 8) Hope, R. W. et al.: Proc. MAG '95, (1995), p.121.
- 9) Knospe, C. R. et al.: Proc. MAG '93, (1993), p.153.
- 10) Knospe, C. R. et al.: Mechatronics, Vol.5, No.4 (1995), p.385.
- 11) Hope, R. W. et al.: Proc. MAG '97, (1997), p.251.
- 12) Hope, R. W. et al.: ASME 98-GT-405, (1998).