

ヘリウム冷凍圧縮機への制御型磁気軸受の応用

亀野浩徳 久保 厚 高畑良一 上山拓知

Application of Active Magnetic Bearings for Helium-Cold Compressor

H. KAMENO A. KUBO R. TAKAHATA H. UHEYAMA

Five degrees of freedom-controlled active magnetic bearings by means of fast digital signal processor (Fixed point TI DSP TMS320C50) for Helium cold compressor application which has extra-ordinary over hung impeller rotor were developed.

The spindle rotor system was designed through the evaluation of its eigen frequency and mode shape through the state space equation derived from finite element based stiffness matrix and mass matrix. Developed Helium-cold compressor was successfully took into service, and operated up to the designed maximum rotational speed of $26\,500\text{min}^{-1}$.

Key Words: active magnetic bearing, digital signal processor, Helium-cold compressor, CERN

1. はじめに

超電導発電機や大型の粒子加速器に用いられる大型超電導磁石は、液体ヘリウム(大気圧で 4.2K (-268.95)による冷却が不可欠であり、専用のヘリウム液化冷凍機が使用される。このような極低温の冷凍機に用いられる膨張タービンやコンプレッサ等の回転機械は冷凍機系内を油等の不純物で汚染することが許されないため、軸受にはガス軸受や磁気軸受が用いられる。特に今回、世界最大の加速器を有するスイスのCERN(欧州原子核共同研究機構)向けに開発した極低温排気コンプレッサは、超流動ヘリウム冷却用のため機械内部の圧力が 1kPa (0.01 気圧)と低くガス軸受が成立しないため、信頼性の面から制御型磁気軸受の適用が必須である。

排気コンプレッサの構造は図1に示すように、縦型で回転軸下端部にはインペラ(羽根車)が装着され、中央部の高周波誘導電動機で $26\,500\text{min}^{-1}$ (442Hz)まで回転させる。インペラ部分は 4.4K (-268.75)の極低温下にあるが、電動機ステータや磁気軸受ステータ部は低温環境でのコイルの熱収縮による断線を避けるため常温部に配置している。排気コンプレッサの性能は常温部から極低温部への熱侵入をいかに抑制するかによって大きく左右されるため、高い圧縮性能を達成するには、下部軸受とインペラ軸端までの距離をロータダイナミクス上可能な限り長く設計する必要がある。

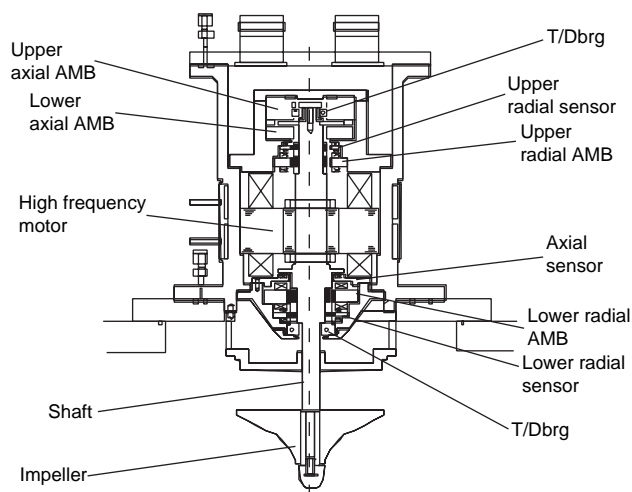


図1 He冷凍圧縮機の構造図

Cross section of 18gr/sec He-cold compressor

また、ヘリウムガスは放電開始電圧が 170V と低いため、電動機や磁気軸受も低電圧のものが使われている。

本報では、本コンプレッサ用に開発したデジタルシグナルプロセッサ(DSP)によるデジタル制御系¹⁾を搭載した、5自由度制御型磁気軸受(AMB)とその回転試験結果について報告する。

2. 回転軸系固有振動数・固有モード解析

制御型磁気軸受を有する回転軸系の設計においては、特にラジアル方向での曲げモードに対する軸受系全体の安定性を事前に十分検討する必要がある。

ある²⁾。すなわち、回転軸系の1次曲げモード固有振動数を回転機の定格回転周波数に対して十分に離すことがキ・ポイントである。

回転軸系は中央に高周波モータロータを備えこれを挟んでラジアル制御型磁気軸受を配置してある。アキシャル制御型磁気軸受はインペラと反対側の軸端部に配置してある。今回開発したスピンドルシステム的设计においては回転軸系を、約100分割し、各分割要素に対して有限要素法ベース(FEM)のスパース型剛性マトリクス[K]ならびに、質量マトリクス[M]を導いた。さらに、材料減衰(内部減衰)は周波数に比例するものと仮定して減衰マトリクス[D]を導出した。これらのマトリクスより、ラジアル方向の制御対象として2入力2出力の状態方程式を導出した。

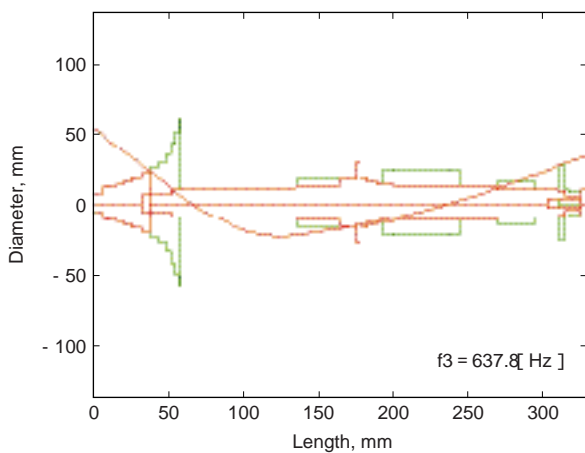


図2.1 1次曲げ固有振動数と1次曲げモード形状
1st bending mode frequency and corresponding mode shape of the He compressor rotor

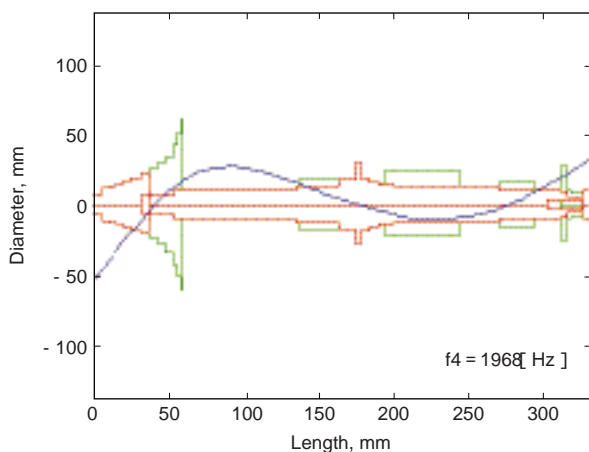


図2.2 2次曲げ固有振動数と2次曲げモード形状
2nd bending mode frequency and corresponding mode shape of the He compressor rotor

さらに、この状態方程式を固有値問題として定式化することにより固有振動数ならびに固有振動モードの解析を実施した。図2.1に1次曲げ固有振動数(f_3)および曲げモード形状(赤曲線)、図2.2に2次曲げ固有振動数(f_4)および曲げモード形状(青曲線)の解析結果をそれぞれ示す。計算結果としては1次の曲げ固有振動数は638Hz、2次は1968Hzであった。最高回転周波数は1次曲げ固有振動数に対して約65%程度であり、アンバランスによる強制外力に対しても有利と判断した。

回転軸系は前述の熱進入を抑制するために、インペラを下部ラジアル磁気軸受から離れた位置に配置させ、オーバハング形状にしてある。そのため、図2.1の赤曲線で示すように、1次曲げモードの凸部は下部ラジアル磁気軸受よりもさらに下側(同図では左側)に位置している。

また、同様にジャイロ作用の影響を考慮するため、ジャイロマトリクス[G]の導入によって前述の状態方程式を4入力4出力に拡大し、回転数の上昇による固有振動数の変化を解析した。結果を図3に示す。なお、同図の1Bは1次曲げ固有振動数のジャイロ分岐を示す。また、1R・2Rは剛体1次および剛体2次固有振動数のジャイロ分岐を示す。同図より、回転数の増加による固有振動数の分岐が小さく、本軸系全体に対するジャイロ作用が微小なことがわかる。

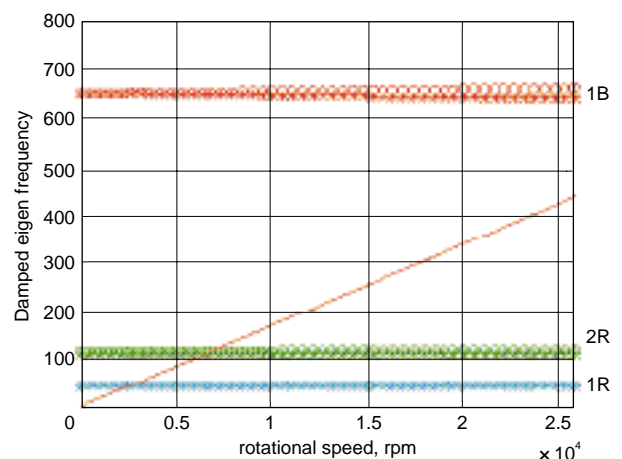


図3 固有振動数に対するジャイロ作用の影響
Eigen mode diagram of the He compressor rotor

3. 制御系および動剛性評価

今回使用した制御型磁気軸受の制御装置仕様および外観形状を図4に示す。また、各制御型磁気軸受の設計仕様を以下に示す。

主要仕様

圧縮機最高回転数	26 500min ⁻¹ (442Hz)
加速時間	60s(0 ~ 26 500min ⁻¹)
回転体総質量	1.8kg
ラジアル方向荷重	(電動機不平衡剛性のみ)
アキシアル方向荷重	60N

ラジアル磁気軸受	下部	上部
軸受径	35.0mm	30.0mm
軸受すきま	0.2mm	0.2mm
負荷容量	120N	80N
定常電流	0.5A	0.6A

アキシアル磁気軸受	下部	上部
ロータディスク外径	52.0mm	
軸受すきま	0.4mm	
負荷容量	250N	
定常電流	0.8A	

補助用転がり軸受	下部	上部
ラジアルすきま	0.1mm	0.1mm
アキシアルすきま	0.2mm	0.2mm

磁気軸受制御用にはテキサスインスツルメント社製の固定小数点型 DSP : TMS320C50を用い、ラジアル方向の4つの変位センサ信号(X1 , Y1 , X2 , Y2)とアキシアル方向の変位センサ信号(Z)の合計5入力をA / D変換した後にサンプリング周波数10kHzでDSPに取り込み、各軸への制御出力を演算している。演算された制御出力はD / A変換された後、電磁石駆動用の10ch電力増幅器へ伝達される³⁾。

ラジアル方向のデジタル制御系では、回転体をもその慣性主軸を中心に回転させることが可能なアンバランス力抑制制御(Imbalance force rejection control)を実現するためのフィードフォワード制御(FFC)もデジタル的にプログラム中で実行する。今回は、サンプリング周波数10kHzにて独立型制御系(De-centered)を構成し、各軸独立な6次のメインコントローラと前述のFFCを働かせたが、DSPの計算負荷は80%程度であった。

さらに、回転センサのパルス信号を利用して、回転数によりコントローラの係数や定常電流、浮上位置コマンド等を切り替えていく一種の適応制御ルーチンを同時に作動させたが、計算負荷の増加は2 ~ 3%程度であった。したがって実用上問題なくさらに高次のコントローラを実装できるものと推定された。

前述の各種解析のみならず、制御型磁気軸受の

制御系設計についても、MATLABで実施したため、非常に効率的な設計作業を実現できた(設計時間を従来の約1 / 3に短縮)。

コントロールユニットは外部PCと制御用DSPとの通信用にRS232Cシリアル通信ポートを有しており、各変位信号・制御出力のモニタやコントローラの変更もこのシリアル通信機能を用いて実行できる。この機能はモデム通信もサポートしているため今回のように海外に機械が設置される場合でも国際電話を通じて同様の作業が可能である。

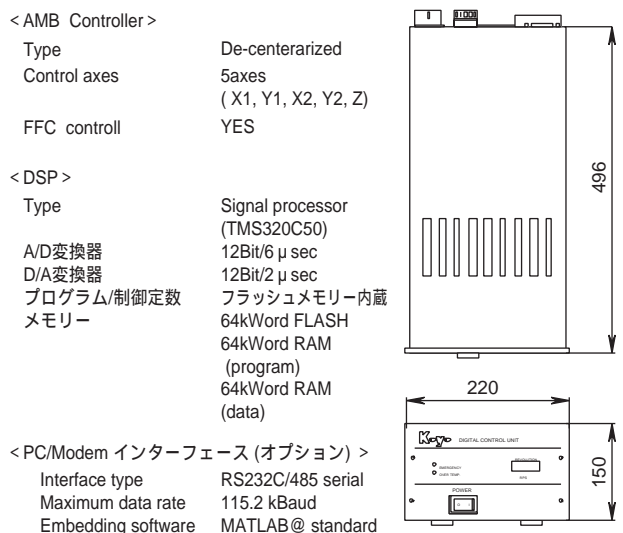


図4 He冷凍圧縮機用制御型磁気軸受コントローラの仕様

Spec. and appearance of the developed He-cold compressor AMB control unit

一方、DSPの入力(センサ信号)・出力(制御信号)に着目した場合、制御系から見た制御対象の周波数応答としての感度関数を測定することにより、制御型磁気軸受のコンプライアンスを間接的に測定することができる。具体的には、電磁石駆動用信号に周期的外乱信号を加算することで、この感度関数を測定できる。図5.1および図5.2は測定されたコンプライアンスを用いてその逆数の動剛性(周波数剛性)関数としてプロットしたものであり、図5.1は上部ラジアル磁気軸受、図5.2は下部ラジアル磁気軸受のそれを示している。両図とも横軸は対数目盛で周波数を示し、縦軸は対数軸でDSP UNIT Bitとしてあるが、

$$10^0 \text{Bit} = 1 \text{は } 1\,000\,000 \text{N/m}$$

$$10^2 \text{Bit} = 100 \text{は } 100\,000\,000 \text{N/m}$$

にそれぞれ相当する。この測定結果より、制御型ラジアル磁気軸受で支持された本コンプレッサロータは上部・下部ラジアル磁気軸受とも約

400 000N/mの等価ばねで支持されており、1次・2次の剛体モードはそれぞれ

1次剛体 1R = 約 60Hz (at 0rpm)

2次剛体 2R = 約116Hz (at 0rpm)

であった。動剛性曲線から2つの剛体モードは十分に減衰されていると判断できる。(剛性曲線の剛体モード周波数付近に深い落ち込みがない。)

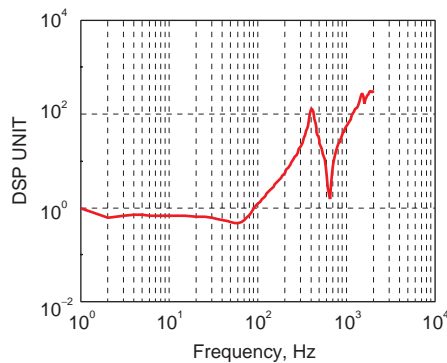


図5.1 下部ラジアル磁気軸受の動剛性測定結果

Measured stiffness of lower radial A.M.B.

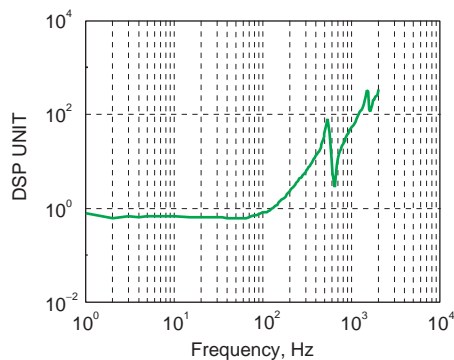


図5.2 上部ラジアル磁気軸受の動剛性測定結果

Measured stiffness of upper radial A.M.B.

一方、150Hz以上は慣性領域に入るため動剛性は増加して行くが1次曲げモードによる共振での落ち込みが、FEM計算結果とほぼ一致する640Hzに明確に現れている。また、下部軸受ではそのピークが上部のそれより深いことがわかる。これは次のいずれかに起因する。

- 1) 1次曲げモードに対する減衰の効果が劣る。
- 2) 上部ラジアルセンサがこの曲げモードを良く検出する。

また、1.4kHz付近の落ち込みは2次曲げモードではなく機械本体のハウジング剛性(弾性)の影響である。

4. 回転試験結果

次に、回転試験を実施した。その結果を図6.1～図6.4に示す。これらの図は、実機の回転状況

での回転振れ回りの様子とその時の上部ラジアル磁気軸制御電流波形を示す。なお、FFCは回転同期周波数として120Hz(7 200rpm)以上の領域で作動するようにプログラムされている。FFC作動前の回転状況(図6.1および図6.2)では、下部軸受で直径10μm、上部軸受で20μmの振れが観測され、制御電流もこれに伴い回転同期成分が大きく観測された。

一方、FFC作動後(図6.3および図6.4)は、振れ回り量も減少し下部・上部ともに直径約5μm以下で回転している。制御電流成分には、高周波モータからのノイズ成分と1次曲げ振動成分がわずかに含まれているが回転同期成分はほとんど含まれていない。

以上のように、回転体の目標回転数までの安定回転を達成できたので、引き続き、本He冷凍圧縮機の性能試験を実施した。その結果、次の成価が得られた。

- 1) 気体Heを4.2K以下まで冷却し、液体Heを生成できた。(18g/sec)
- 2) 本He冷凍圧縮機の液体He生成効率是世界トップレベルであった。

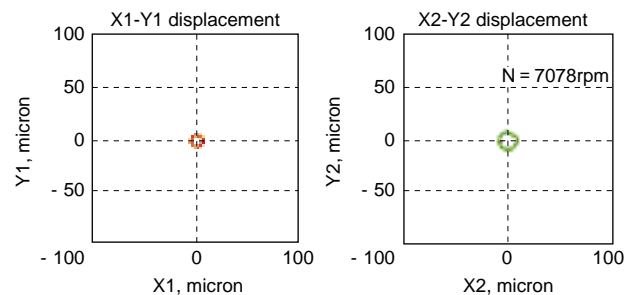


図6.1 7 000min⁻¹での振れ回り

Measured run-out of radial A.M.B.

lower (left) and upper (right) at 7 000min⁻¹

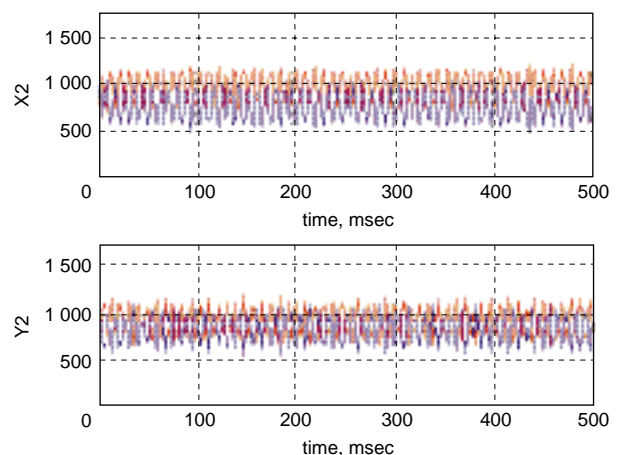


図6.2 上部ラジアル磁気軸受 制御電流波形

7 000min⁻¹

Measured control current of radial A.M.B.

lower(left) and upper(right) at 7 000min⁻¹

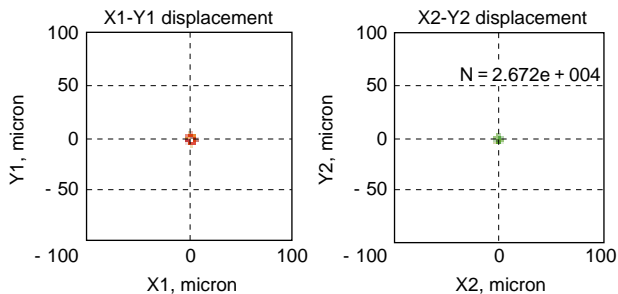


図6.3 26 700min⁻¹での振れ回り
Measured run-out of radial A.M.B.
lower (left) and upper (right) at 26 700min⁻¹

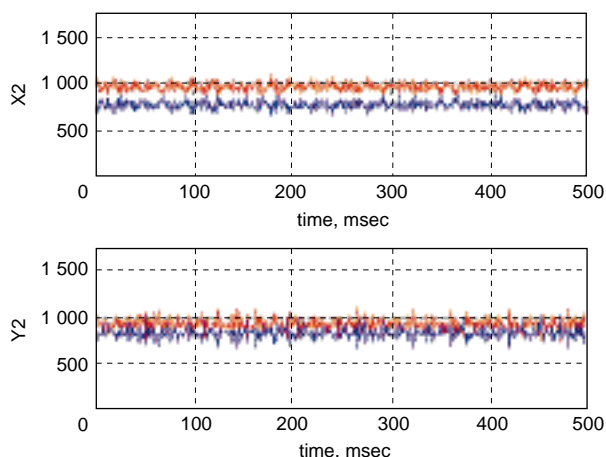


図6.4 上部ラジアル磁気軸受 制御電流波形
26 700min⁻¹
Measured control current of radial A.M.B.
lower (left) and upper (right) at 26 700min⁻¹

今後さらにデジタル制御系による制御型磁気軸受の高機能化と、柔軟性が加速されると考えられ、応用例の増大とともに低価格化も実現されるものと期待される。

最後に、Koyo磁気軸受を採用頂いて、本He冷凍圧縮機システムの設計・製作を実施された石川島播磨重工業株式会社省エネ機器システム部殿に謝意を表します。

参考文献

- 1) 上山他, 制御型磁気軸受の高速回転体への応用, 日本機械学会第74期通常総会講演会資料集(1997)404 .
- 2) 岡田他, 磁気軸受の基礎と応用, 日本機械学会編: 新技術融合シリーズ: 第1巻 .
- 3) 上山他, Stability analysis for high speed rotor suspended by AMB under large gyro-effect , APVC97講演論文集vol. 2. 1039 .

5. おわりに

スイスのCERN(欧州原子核共同研究機構)向けのHe冷凍圧縮機用に開発したDSPデジタル制御系を搭載した、5自由度制御型磁気軸受とその回転試験を実施し以下の結論を得た。

- 1) サンプル周波数10kHzにて各軸6次の独立型メインコントローラと、アンバランス力抑制制御系を実行した。その結果、DSP C50の計算負荷は80%程度であった。
- 2) 回転数によりコントローラの係数や定常電流、浮上位置コマンド等も切り替えることの可能な一種の適応制御ルーチンを同時に作動させた。その結果、計算負荷は2~3%程度増加したが、実用上問題なくさらに高次のコントローラを実装できるものと推定された。
- 3) 回転体の目標回転数までの安定回転を達成できた。その結果、本He冷凍圧縮機は世界トップレベルの液体He生成効率を達成できた。

筆者



亀野浩徳*
H. KAMENO



久保 厚*
A. KUBO



高畑良一**
R. TAKAHATA



上山拓知*
H. UEYAMA

* 総合技術研究所 電子システム研究所
電子システム技術開発部

** 総合技術研究所 電子システム研究所
電子システム技術開発部 工学博士