

# 目 次

## 第1章 磁気軸受の概要

1.1 磁気浮上の長所と欠点	1	1.4 磁気浮上・磁気軸受の代表的な応用例	6
1.2 磁気浮上の歴史	2	参考文献	7
1.3 磁気浮上の分類、特徴と選定法	3		

## 第2章 吸引制御磁気浮上の基礎

2.1 吸引制御方式の原理と特徴	9	(1) 電磁石の磁気吸引力	32
2.2 モデル化と制御方式	13	(2) 電磁石材料の選定	32
2.2.1 磁回路	13	2.3.2 センサ	34
2.2.2 吸引力とインダクタンス	14	(1) 湧電流型変位センサ	34
2.2.3 磁気浮上系のモデリング(上部電磁石のみの場合)	15	(2) インダクタンス型変位センサ	36
(1) 電磁気的諸量の導出	15	(3) 容量(キヤパンタンス)型変位センサ	37
(2) 状態方程式の導出	17	(4) 光学式(PSD)変位センサ	37
2.2.4 磁気浮上系のモデリング(上下に電磁石を配置する場合)	21	2.3.3 セルフセンシング(センサレス)技術	38
2.2.5 磁気浮上系のモデリング(永久磁石を併用する場合)	23	2.4 制御回路	41
2.2.6 磁気浮上系の制御方式	24	2.4.1 アナログ演算回路	42
(1) PID制御	24	2.4.2 ディジタル演算回路	44
(2) 最適レギュレータ	27	2.5 パワーアンプ	47
(3) 積分型最適レギュレータ	29	2.5.1 リニアアンプ	48
(4) 永久磁石併用磁気浮上系の制御	30	2.5.2 PWMアンプ	51
2.3 構成要素の動作原理と選定法	32	2.6 磁気軸受システム用回転モータ	52
2.3.1 アクチュエータ(電磁石)	32	参考文献	55

## 第3章 吸引制御磁気軸受(剛性ロータとその制御)

3.1 剛性ロータの構成とダイナミクス	57	3.1.2 剛性ロータのダイナミクス	60
3.1.1 剛性ロータ	57	3.2 制御系設計と動特性	66

3.2.1 PID 制御系	66	(2) 電流変動零化制御	89
3.2.2 制御回路	68	(3) 吸引力変動零化制御	89
3.2.3 制御要素の周波数特性	72	3.3.4.2 内部モデル原理に基づく 不つり合い補償	90
3.2.4 ノッチフィルタによる安定化 補償	74	(1) 変位変動零化制御	90
3.3 回転体固有の現象に着目した 制御	80	(2) 電流変動零化制御	93
3.3.1 ジャイロ効果	80	(3) 吸引力変動零化制御	95
3.3.2 ジャイロ補償最適レギュレータ	82	3.3.4.3 補償入力の振幅と位相を 直接調整する不つり合い 補償	96
3.3.3 不つりあい振動特性	84	3.3.4.4 不つりあい補償について (まとめ)	97
3.3.4 不つりあい補償	86	参考文献	98
3.3.4.1 オブザーバを利用した不 つりあい補償	87		
(1) 変位変動零化制御	89		

#### 第4章 弾性ロータのダイナミクスと制御

4.1 ロータの形状と動的性質	100	4.2.2 有限要素法	106
4.1.1 剛性ロータと弾性ロータ	100	4.2.3 3個のフライホイールをもつ ロータの解析例	109
(1) 弾性ロータのつりあわせ	101	4.2.4 物理領域とモード領域の対応	111
(2) 弾性ロータとしての磁気軸 受制御	101	4.2.5 弾性ロータ・磁気軸受系の モデリング	113
4.1.2 ロータの形状	102	4.3 弾性ロータ・磁気軸受系の制御	115
4.1.3 ロータの形状と動的性質	102	4.3.1 弾性ロータ・磁気軸受系の 制御の特徴	115
(1) 両持ちロータと片持ちロータ	103	4.3.2 弾性ロータの制御例	120
(2) ロータの剛性分布と質量分布	103	4.3.3 傾き制御磁気軸受による弾 性ロータの支持	122
(3) 高速回転ロータとジャイロモ ーメント	104	参考文献	123
4.2 弾性ロータのモデル化と解析手法	105		
4.2.1 構造解析手法の概要	105		

#### 第5章 セルフベアリングモータ

5.1 セルフベアリングモータの機能	125	5.2.1 ラジアル形セルフベアリング モータ	127
5.2 基本原理	127		

(1) モータ巻き線と磁気軸受巻き 線からの磁束	127	5.2.2 アキシャル形セルフベアリングモータ	131
(2) ロータとステータの極数の組 み合わせ	129	5.3 制御方法	132
		5.4 セルフベアリングモータの応用例	134
		参考文献	136

## 第6章 超電導磁気浮上と超電導磁気軸受

6.1 超電導の原理と特徴	137	(2) 減衰定数	151
6.1.1 超電導体の分類	137	6.3.3 ゼロ磁場中冷却による浮上系	152
6.1.2 超電導と常電導の自由エネルギー	138	6.3.4 超電導磁気浮上と超電導磁気軸受	153
6.1.3 ピン止め機構と臨界電流密度	139	6.4 超電導磁気浮上の応用	153
6.1.4 磁束クリープおよび磁束フロー	140	6.4.1 超電導磁気軸受	154
6.1.5 ピン止め効果をもつ高温超電導体の合成プロセス	141	(1) 構成	154
6.2 超電導磁気浮上	142	(2) 静特性と回転特性	155
6.2.1 浮上方式と原理	142	(3) 超電導磁気軸受の展望	156
6.2.2 ゼロ磁場中冷却と磁場中冷却による浮上力の違い	144	6.4.2 超電導フライホイール	156
6.2.3 浮上力の時間変化	147	(1) 超電導フライホイールの原理	157
6.2.4 動作温度による浮上力の違い	148	(2) 貯蔵エネルギーと効率	157
6.3 超電導磁気浮上におけるダイナミックス	149	(3) 超電導フライホイールの開発の現状	158
6.3.1 浮上系の振動特性	150	(4) 超電導フライホイールの課題	159
(1) 動特性評価方法	150	6.4.3 リニア搬送車およびリニアモータカー	160
(2) 振動波形	150	6.4.4 超電導モータおよびその他	161
6.3.2 浮上系の振動のモデル化	151	の応用	161
(1) 剛性	151	6.4.5 高温超電導線材の磁気浮上応用	161
		参考文献	162

## 第7章 磁気軸受の応用と今後の展望

7.1 小型機械への応用	165	7.1.3 曝(ばつ)気用ブロワ	167
7.1.1 ターボ分子ポンプ	165	7.1.4 炭酸ガスレーザ用ブロワ	168
7.1.2 冷却水チラー用圧縮機	166	7.1.5 空気圧縮機	169

7.1.6 中性子チョッパ	169	ール	176
7.1.7 血液ポンプ	170	7.3.2 アンテナ駆動機構	177
7.2 大型機械への応用	172	7.3.3 分光計用線形移動機構	179
7.2.1 多段遠心圧縮機	172	7.3.4 超高精度位置決め機構	181
7.2.2 モータ直結型圧縮機	173	7.3.5 クリーンルーム用ロボット機構	182
7.2.3 ターボ膨張機	173	7.3.6 半導体搬送装置	182
7.2.4 LNG ポンプ	174	7.3.7 精細作業を器用にこなす磁気 浮上:コンプライアンスハンド	183
7.2.5 水車発電機	175	7.3.8 真空用 R-θロボット	184
7.3 その他の応用	176	参考文献	185
7.3.1 宇宙用磁気軸受フライホイ			